

ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DES DEPOTS DELTAIQUES DE GRANGES-PRES-MARNAND

THESE No 818 (1989)

PRESENTÉE AU DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES

PAR

PASCAL TISSIERES

Ingénieur civil diplômé EPFL
originaire de Martigny et Orsières (VS)

acceptée sur proposition du jury :

Prof. J. Gabus, rapporteur
Prof. P. Baumgartner, corapporteur
Prof. E. Recordon, corapporteur
Dr Ch. Schlüchter, corapporteur

Lausanne, EPFL
1990

TABLE DES MATIERES

| | |
|--------------------------|-----|
| Résumé | I |
| Liste des figures | III |
| Liste des tableaux | VII |
| Notations | IX |

| | |
|----------------------------|----------|
| I INTRODUCTION..... | 1 |
|----------------------------|----------|

| | |
|--|----------|
| II CONTEXTE GEOLOGIQUE DU SITE DE GRANGES | 2 |
|--|----------|

| | |
|---|----|
| 1. CADRE GENERAL | 2 |
| 2. LE BASSIN VERSANT DE LA LEMBE | 3 |
| 2.1. Description des formations traversées par la Lembe | 5 |
| 2.2. Etude hydrologique sommaire de la Lembe | 6 |
| 3. LE DELTA DE GRANGES | 10 |
| 3.1. Généralités | 10 |
| 3.2. Caractéristiques du bassin récepteur | 10 |
| 3.3. Les top-sets | 10 |
| 3.4. Les fore-sets | 12 |

| | |
|---------------------------------|-----------|
| III SEDIMENTOLOGIE | 20 |
|---------------------------------|-----------|

| | |
|--|----|
| 1. GENERALITES | 20 |
| 2. ETUDE COMPARATIVE DU BASSIN VERSANT ET DU DELTA DE LA LEMBE | 22 |
| 2.1. Analyses minéralogiques et pétrographiques | 22 |
| 2.1.1. Minéralogie des sédiments fins | 22 |
| 2.1.2. Pétrographie des dépôts grossiers | 24 |
| 2.2. Courbes granulométriques | 25 |
| 2.2.1. Introduction | 25 |
| 2.2.2. Allure des courbes granulométriques | 27 |
| A) Approche Doeglas | 27 |
| B) Approche Kittleman | 28 |
| C) Approche Rivière | 28 |
| D) Approche Visher | 31 |
| 2.3. Classes granulométriques | 32 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.4. | Indices granulométriques | 33 |
| 2.4.1. | Moyenne | 34 |
| 2.4.2. | Ecart-type | 34 |
| 2.4.3. | Dissymétrie | 35 |
| 2.4.4. | Degré de pic | 35 |
| 2.4.5. | Approche Passega | 38 |
| 2.5. | Morphométrie des graviers et des pierres | 39 |
| 2.6. | Morphoscopie et exoscopie des sables de quartz | 40 |
| 2.6.1. | Morphoscopie : application à notre étude | 40 |
| 2.6.2. | Exoscopie : application à notre étude | 42 |
| 2.7. | Autres méthodes | 42 |
| 2.7.1. | Analyses factorielles | 44 |
| 2.7.2. | Analyses discriminantes | 44 |
| 3. | CONCLUSIONS SUR LES METHODES COMPLEMENTAIRES | 44 |
| 3.1. | Allure des courbes granulométriques | 44 |
| 3.2. | Classes granulométriques dans les diagrammes ternaires | 45 |
| 3.3. | Indices | 45 |
| 3.4. | Morphométrie des graviers et des pierres | 46 |
| 3.5. | Morphoscopie des quartz | 46 |
| 3.6. | Exoscopie des quartz | 46 |
| IV | DEFORMATIONS DES TOP-SETS DE GRANGES | 48 |
| 1. | GENERALITES | 48 |
| 2. | EXAMEN DETAILLE DES TOP-SETS | 50 |
| 2.1. | Les balls-and-pillows | 51 |
| 2.2. | Les diapirs | 51 |
| 2.3. | Les irregular contortions | 51 |
| 2.4. | Les pillars | 51 |
| 2.5. | Les pockets | 55 |
| 2.6. | Relation stratigraphique | 55 |
| 3. | CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES TOP-SETS | 56 |
| 4. | ETUDES DES MECANISMES DE DEFORMATIONS | 60 |
| 4.1. | Tour d'horizon bibliographique des déformations observées in-situ | 60 |
| 4.2. | Tour d'horizon bibliographique des expérimentations en laboratoire | 60 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.3. | Présentation des mécanismes | 62 |
| 1. | TURBULENCE..... | 65 |
| 1.1. | Matériau..... | 65 |
| 1.2. | Milieu..... | 65 |
| 1.3. | Etat déformé..... | 65 |
| 1.4. | Description..... | 65 |
| 1.5. | Courants de turbidité..... | 67 |
| 2. | RUPTURE SOUS CHARGE PONCTUELLE..... | 68 |
| 2.1. | Matériau..... | 68 |
| 2.2. | Milieu..... | 68 |
| 2.3. | Etat déformé..... | 68 |
| 2.4. | Description..... | 68 |
| 3. | CRYOTURBATION..... | 70 |
| 3.1. | Matériau..... | 70 |
| 3.2. | Milieu..... | 70 |
| 3.3. | Etat déformé..... | 70 |
| 3.4. | Description..... | 71 |
| 4. | DEGAZAGE DES SEDIMENTS..... | 74 |
| 4.1. | Matériau..... | 74 |
| 4.2. | Milieu..... | 74 |
| 4.3. | Etat déformé..... | 74 |
| 4.4. | Description..... | 74 |
| 5. | BIOTURBATION..... | 76 |
| 5.1. | Matériau..... | 76 |
| 5.2. | Milieu..... | 76 |
| 5.3. | Etat déformé..... | 76 |
| 5.4. | Description..... | 76 |
| 6. | RUPTURE PAR CISAILLEMENT INDUISANT UN GLISSEMENT..... | 78 |
| 6.1. | Matériau..... | 78 |
| 6.2. | Milieu..... | 78 |
| 6.3. | Etat déformé..... | 78 |
| 6.4. | Description..... | 78 |
| 7. | GONFLEMENT DES ARGILES..... | 80 |
| 7.1. | Matériau..... | 80 |
| 7.2. | Milieu..... | 80 |
| 7.3. | Etat déformé..... | 80 |
| 7.4. | Description..... | 80 |
| 8. | FLUAGE..... | 84 |
| 8.1. | Matériau..... | 84 |
| 8.2. | Milieu..... | 84 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 8.3. | Etat déformé..... | 84 |
| 8.4. | Description..... | 84 |
| | | |
| 9. | LIQUEFACTION PAR SURCHARGE APPLIQUEE RAPIDEMENT..... | 85 |
| 9.1. | Matériau..... | 85 |
| 9.2. | Milieu..... | 85 |
| 9.3. | Etat déformé..... | 85 |
| 9.4. | Description..... | 85 |
| 9.4.1. | Dépôts de sédiments grossiers sur un lit fin..... | 86 |
| 9.4.2. | Dépôts de sédiments fins..... | 87 |
| 10. | LIQUEFACTION SOUS L'EFFET D'UN SEISME..... | 89 |
| 10.1. | Matériau..... | 89 |
| 10.2. | Milieu..... | 89 |
| 10.3. | Etat déformé..... | 89 |
| 10.4. | Description..... | 89 |
| 10.5. | Analyse de la source d'origine tectonique..... | 91 |
| 10.6. | Sismicité de la région de Granges..... | 92 |
| 11. | LIQUEFACTION SOUS L'EFFET DE LA HOULE..... | 94 |
| 11.1. | Matériau..... | 94 |
| 11.2. | Milieu..... | 94 |
| 11.3. | Etat déformé..... | 94 |
| 11.4. | Description..... | 94 |
| | | |
| 12. | LIQUEFACTION SOUS L'EFFET D'UNE CRUE..... | 97 |
| 12.1. | Matériau..... | 97 |
| 12.2. | Milieu..... | 97 |
| 12.3. | Etat déformé..... | 97 |
| 12.4. | Description..... | 97 |
| | | |
| 5. | CONCLUSION | 99 |
| | Liste des annexes | 103 |
| 1. | Coupes géologiques dans la Vallée de la Lembe..... | 104 |
| 2. | Interprétation sédimentologique des courbes granulométriques..... | 109 |
| I | Approche Doeglas 1946..... | 116 |
| II | Approche Kittleman 1964..... | 117 |
| III | Approche Rivière 1977..... | 118 |
| IV | Approche Visser 1969..... | 121 |
| 3. | Equations mathématiques des courbes granulométriques..... | 135 |
| 4. | Inventaire des termes décrivant les déformations pénécen- taires des sédiments..... | 143 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 5. | Delta de Granges : Dossier photographique..... | 149 |
| 6. | Essais en laboratoire sur les sédiments de Granges..... | 157 |
| 6.1 | Analyses chimiques..... | 158 |
| 6.2 | Poids volumique apparent sec minimum..... | 159 |
| 6.3 | Calcul du coefficient de perméabilité verticale à partir de γ_{dmin} | 164 |
| 6.4 | Résultats des essais au perméamètre à charge variable..... | 167 |
| 6.5 | Essais oedométriques..... | 168 |
| 6.6 | Essais triaxiaux standards..... | 177 |
| 6.7 | Essais triaxiaux dynamiques..... | 179 |
| 6.8 | Table vibrante..... | 192 |
| 7. | Mécanismes de déformations..... | 193 |
| 7.1 | Liquéfaction par surcharge appliquée rapidement..... | 194 |
| 7.2 | Liquéfaction sous l'effet d'un séisme..... | 204 |
| 7.3 | Liquéfaction sous l'effet de la houle..... | 217 |
| 7.4 | Liquéfaction sous l'effet d'une crue..... | 223 |
| 7.5 | Dégazage des sédiments..... | 226 |
| 8. | Inventaire des types de déformations observées dans la nature et de leur genèse..... | 229 |
| 9. | Inventaire des expérimentations géologiques..... | 243 |
| | Références bibliographiques | 250 |
| | Remerciements | 258 |
| | Curriculum vitae | 259 |
| | Liste des publications | 259 |

RESUME

Les déformations pénécontemporaines du delta de Granges-près-Marnand que Parriaux 1979, du Laboratoire de Géologie de l'EPFL, avait découvert, font l'objet de ce travail. Il présente deux volets bien distincts:

- une approche naturaliste pour la sédimentologie des dépôts et
- une approche physique pour les mécanismes de déformations.

Après une étude du bassin versant de la Lembe, le delta de Granges est analysé du point de vue sédimentologique, en passant en revue l'ensemble des méthodes mises au point par les géologues. Les courbes granulométriques sont traitées selon les procédures de

- Doeglas 1946,
- Kittleman 1964,
- Rivière 1977 et
- Visher 1969.

Il ressort que leurs interprétations sur les conditions de dépôt ne possèdent pas un caractère universel. Cette même constatation est valable pour les approches fondées sur les classes granulométriques, les indices granulométriques, le centile supérieur/médiane, la morphométrie des graviers et des pierres, la morphoscopie et l'exoscopie des sables de quartz. En fait toutes ces méthodes conservent leur intérêt comme comparaison au sein d'un même bassin bien déterminé et comme complément à l'analyse des faciès et des structures sédimentaires.

Nous avons ensuite décrit les déformations pénécontemporaines du delta de Granges, après en avoir défini la terminologie. En effet, les expressions utilisées dans la littérature sont souvent entachées d'une connotation génétique. On trouve aussi une multitude de synonymes pour désigner le même phénomène. A Granges nous reconnaissons des balls-and-pillows, des diapirs, des irregular contortions, des pillars et

des pockets apparaissant dans des sables et des limons. Ces sédiments sont étudiés avec les tests habituels de la géotechnique (oedomètre, cellule triaxiale, etc.).

Puis nous avons établi un catalogue des déformations et des mécanismes décrits dans la littérature pour mettre en évidence les milieux sédimentaires et les mécanismes probables. De cet éventail nous avons retenu douze mécanismes:

- la turbulence,
- la cryoturbation,
- le dégazage des sédiments,
- la bioturbation,
- le gonflement des argiles,
- le fluage,
- la liquéfaction par surcharge appliquée rapidement,
- la liquéfaction sous l'effet d'un séisme,
- la liquéfaction sous l'effet de la houle et
- la liquéfaction sous charge ponctuelle.

Chaque mécanisme est décrit et analysé du point de vue physique dans les annexes, avec une revue des connaissances actuelles et/ou des approches mises au point dans le cadre de ce travail. L'accent est porté sur toutes les formes de liquéfaction, car ce processus est à l'origine de la plupart des déformations contemporaines.

Nous concluons que les crues et débâcles causent en bien des cas les déformations observées dans les deltas.

LISTE DES FIGURES

- 1 Paléogéographie du delta de la Lembe (Parriaux 1979)
- 2 Carte générale (1:25'000)
- 3 Profil en long de la Lembe et de ses affluents
- 4 Situation des coupes du delta de Granges
- 5 Profil géologique 1 du delta de Granges (Parriaux 1979)
- 6 Profil géologique 2 des top-sets de Granges
- 7 Profil géologique 3 des top-sets et des fore-sets
- 8 Détail 4 des top-sets déformés de Granges
- 9 Profil géologique des tranchées 5, 6 et 7 à Granges
- 10 Profil géologique des sondages 8 et 9 à la tarière à Granges
- 11 Tectonique synsédimentaire due au retrait glaciaire
- 12 Relation entre l'hydraulique et la sédimentologie
- 13 Classification des sédiments par les indices \bar{X} et N
(Rivière 1977)
- 14 Relation entre les populations de grains transportés et déposés
- 15 Diagramme ternaire 10-50 μm avec domaines tirés de la littérature
- 16 Représentation graphique des moyennes et tris des échantillons de la Lembe
- 17 Classification des dépôts par les indice moyenne Mz-Tri σ_1
- 18 Relation entre les indices granulométriques des échantillons de la Lembe
- 19 Classification des dépôts par les indices d_{50} - d_{99} (Passegga 1964)
- 20 Morphométrie des galets de la Lembe
- 21 Exoscopie des quartz de la Lembe
- 22 Déformations des top-sets sous le chenal graveleux à Granges
(photo A. Parriaux)
- 23 Vergence des déformations des top-sets de Granges
- 24 Top-set de Granges: ball-and-pillow, diapir et irregular contortions (photo A. Parriaux)
- 25 Top-sets de Granges: dimensions des déformations
- 26 Courbes granulométriques des échantillons standards de Granges
- 27 Relation entre la perméabilité verticale et l'indice de vide des sols de Granges
- 28 Modes de transport fluviatile

- 29 Cisaillement critique entraînant l'affouillement (Lane 1953)
- 30 Instabilité de Kelvin-Helmholtz (Rosenhead 1931)
- 31 Mode de rupture d'un sol suivant sa densité relative (Vesic 1963)
- 32 Contrainte de rupture en fonction de l'angle de frottement interne
- 33 Exemple de relation conductivité hydraulique - succion - teneur en eau pour des sols non saturés (Dysli 1983)
- 34 Vitesse moyenne de gonflement en fonction du pourcentage des grains $< 0,02$ mm et du type de sol (Kaplar 1974)
- 35 Cryoturbation dans les limons non saturés
- 36 Diagramme de l'évolution des émissions gazeuses dans une décharge contrôlée (Aragno 1985)
- 37 Zones de colonisation dans un chenal tidal (Reineck 1978)
- 38 Coupe à travers un slump (Lewis 1971)
- 39 Double couche électrique autour de la montmorillonite à l'état sec et saturé en eau
- 40 Schéma montrant le changement de structure thixotropique des argiles avec le temps (Mitchell 1960)
- 41 Structures sédimentaires de consolidation (Lowe 1975)
- 42 Carte de risques sismiques (Saegesser et Mayer-Rosa 1978)
- 43 Probabilité de risque sismique à Granges selon Saegesser et Mayer-Rosa 1978
- 44 Répartition des contraintes dues à la houle dans le sol (d'après Madsen 1978)
- 45 Tempête sur le lac de la Broye
- 46 Variation des vitesses du sol lors de la crue du 20.12.1982 de l'Aubonne (VD)
- 47 Ball-and-pillow obtenu sur la table vibrante de l'EPFL (DME)

Annexe 1 :

- 48 Coupe de la chambre de captage de Combremont-le-Petit
- 49 Essai d'infiltration C7 à L'Oche près de Coumin-Dessus
- 50 Essai d'infiltration C9 à L'Oche près de Coumin-Dessus
- 51 Essai d'infiltration No. 2 à Nervaux près de Chapelle

Annexe 2 : Courbes granulométriques

- 52 Classification des courbes selon trois types principaux (Doeglas 1946)
- 53 Variabilité granulométrique obtenue par l'aréomètre (deux analyses)
- 54 Définition des populations et des points de troncature d'une courbe granulométrique (Visser 1969)
- 55 Courbes granulométriques 1 : Aquitanien
- 56 Courbes granulométriques 2 : Aquitanien
- 57 Courbes granulométriques 1 : Moraine de fond
- 58 Courbes granulométriques 2 : Moraine de fond
- 59 Courbes granulométriques 1 : Fore-set de Granges
- 60 Courbes granulométriques 2 : Fore-set de Granges
- 61 Courbes granulométriques 1 : Top-set de Granges
- 62 Courbes granulométriques 2 : Top-set de Granges

Annexe 3 :

- 63 Graphes des équations mathématiques : sable deltaïque S5 de Granges
- 64 Graphes des équations mathématiques : moraine de fond MC de Coumin

Annexe 5 :

- 65 Panorama de la gravière de Granges
- 66 Tectonique synsédimentaire dans les fore-sets de Granges
- 67 Aspect chaotique des déformations de Granges
- 68 Ball-and-pillow de Granges
- 69 Diapir de sable et dish structures de Granges
- 70 Diapir de limon de Granges
- 71 Ball-and-pillow de Granges
- 72 Irregular contortions (coupe sériée) de Granges
- 73 Irregular contortions (coupe sériée) de Granges
- 74 Irregular contortions (coupe sériée) de Granges
- 75 Irregular contortions (coupe sériée) de Granges
- 76 Ball-and-pillow et pillar de limon de Granges
- 77 Dish et diapir de limon de Granges
- 78 Diapir et pocket de limon de Granges

Annexe 6

- 79 Poids volumique apparent sec en fonction de la hauteur de la colonne de sédiments
- 80 Hauteur de décantation en fonction du temps (limon standard de Granges)
- 81 Essais oedométriques : tassements en fonction du temps
- 82 Courbe oedométrique du sable standard de Granges
- 83 Courbe oedométrique du limon standard de Granges
- 84 Construction d'Asaoka : tassements en fonction du temps
- 85 Construction d'Asaoka : coefficients b et C_v
- 86 Contraintes totales et pressions interstitielles dans la cellule triaxiale dynamique
- 87 Essai triaxial dynamique du 27.11.1985 : sable de Granges
- 88 Essai triaxial dynamique du 5.12.1985 : sable de Granges
- 89 Essai triaxial dynamique du 17.12.1985 : sable de Granges
- 90 Essais triaxiaux dynamiques : sable de Granges, paliers de charge

Annexe 7

- 91 Définition des symboles pour la consolidation unidirectionnelle
- 92 Limite de fluidisation en fonction du diamètre des particules
- 93 Vitesse de fluidisation en fonction du diamètre des particules
- 94 Consolidation verticale : coefficient a du gradient hydraulique en fonction du temps et de la profondeur (report graphique du tableau 43)
- 95 Liquéfaction initiale du sable standard de Granges
- 96 Diagramme d'état du limon standard de Granges
- 97 Sondages No. 10 et 11 au pénétromètre dynamique BEVAC P2 à Granges
- 98 Relation entre le nombre équivalent de cycles et le rapport de contrainte t/s' (Nataraja et al. 1983)
- 99 Liquéfaction sous l'effet de la houle (delta de Granges)
- 100 Schéma de prise des mesures dynamiques
- 101 Analyse spectrale de la crue de l'Aubonne (20.12.1982)
- 102 Définition des symboles (dégazage)

LISTE DES TABLEAUX

- 1 Chronologie des dépôts de la Lembe
- 2 Description sédimentologique des top-sets de Granges
- 3 Description sédimentologique des fore-sets de Granges
- 4 Rides de vague (indices de Tanner : moyenne \pm écart-type)
- 5 Classification des milieux sédimentaires selon leur régime
- 6 Variation de la teneur en carbonate du grès aquitainien A en fonction du diamètre
- 7 Relation entre la taille des sédiments et le milieu de dépôt
- 8 Aperçu des méthodes de détermination de la courbe granulométrique
- 9 Synthèse des déduction sédimentologiques
- 10 Méthodes de laboratoire pour l'identification des milieux sédimentaires
- 11 Types de déformations pénécontemporaines
- 12 Caractéristiques géotechniques des top-sets de Granges
- 13 Liste des mécanismes et des déformations
- 14 Environnements sédimentologiques et déformations
- 15 Comportement du sol face aux séismes
- 16 Caractéristiques des tremblements de terre

Annexe 2 :

- 17 Représentation graphique des mesures sur la taille des grains
- 18 Description des échantillons et liste des essais effectués
- 19 Pourcentages pondéraux des échantillons analysés par tamisage (Lembe)
- 20 Interprétation des courbes granulométriques selon Doeglas 1946
- 21 Interprétation des courbes granulométriques selon Rivière 1977
- 22 Interprétation des courbes granulométriques selon Visser 1969
- 23 Résultats numériques des approches sédimentologiques
- 24 Définition des indices granulométriques
- 25 Valeurs des indices granulométriques tirées de la littérature
- 26 Résultats numériques des indices granulométriques de la Lembe

Annexe 3 :

- 27 Equation des courbes granulométriques en fonction du pourcentage pondéral

- 28 Equation des courbes granulométriques en fonction du diamètre équivalent
- 29 Equations mathématiques de la courbe granulométrique S5 - sable deltaïque S5 de Granges
- 30 Résultats numériques des équations mathématiques : sable deltaïque S5 de Granges
- 31 Equations mathématiques de la courbe granulométrique : moraine de fond MC de Coumin
- 32 Résultats numériques des équations mathématiques : moraine de fond MC de Coumin

Annexe 6 :

- 33 Poids volumique apparent sec minimum (échantillons saturés)
- 34 Poids volumique apparent sec du limon standard en fonction du temps (échantillons saturés)
- 35 Coefficients de perméabilité tirés des essais de décantation
- 36 Résultats des essais au perméamètre à charge variable (sable de Granges)
- 37 Résultats numériques des essais oedométriques (sédiments de Granges)
- 38 Résultats des essais triaxiaux sur les sédiments de Granges
- 39 Essai triaxial dynamique du 27.11.1985 : sable de Granges
- 40 Essai triaxial dynamique du 5.12.1985 : sable de Granges
- 41 Essai triaxial dynamique du 17.12.1985 : sable de Granges

Annexe 7 :

- 42 Résultats numériques des vitesses d'entraînement et de liquéfaction en fonction du diamètre des particules
- 43 Consolidation verticale : coefficient α du gradient hydraulique en fonction du temps et de la profondeur
- 44 Nombre critique de coups SPT en fonction de l'intensité sismique
- 45 Coefficient d'affaiblissement en fonction de l'intensité sismique
- 46 Coefficient d'amortissement en fonction de la profondeur et du type de terrain
- 47 Nombre de cycles équivalents de cisaillement moyen en fonction de l'intensité sismique
- 48 Vibrations de la rive de l'Aubonne à Chanivaz pendant une crue

NOTATIONS

Les dimensions sont données en termes de masse (kg), longueur (m), temps (s) et température (°C).

| | | |
|------------------|--|---------------------------|
| A | = indice d'aplatissement de Cailleux et Tricart 1959 | (-) |
| c | = cohésion | (kN/m ²) |
| Cc | = indice de compression | (-) |
| Cv | = coefficient de consolidation | (m ² /s) |
| Cα | = coefficient de consolidation volumétrique | (kN/m ²) |
| d | = diamètre (équivalent) des grains | (mm) |
| e | = indice de vide | (-) |
| E _{oed} | = module d'élasticité oedométrique | (kN/m ²) |
| F | = force | (N) |
| g | = accélération de la gravité | (m ² /s) |
| h | = hauteur | (mm) |
| H | = hauteur de l'échantillon | (mm) |
| i | = gradient hydraulique | (-) |
| k | = coefficient de perméabilité de Darcy | (m/s) |
| K | = coefficient de Drucker-Prager | (kN/m ²) |
| mv | = coefficient de compressibilité | (m ² /kN) |
| n | = porosité | (%) |
| N | = indice d'évolution granulométrique de Rivière 1977 | (-) |
| N | = nombre de pores en séries | (-) |
| p | = pourcentage pondéral des tamisats | (%) |
| p | = pression | (kN/m ²) |
| r | = rayon du grain sphérique | (mm) |
| R | = rayon de la bulle de gaz | (mm) |
| Re | = nombre de Reynolds | (-) |
| s | = surface, section | (m ²) |
| t | = temps | (s) |
| T | = température | (°C) |
| T _v | = facteur de durée | (-) |
| u | = pression interstitielle | (kN/m ²) |
| v | = vitesse | (m/s) |
| vs | = vitesse limite de chute des grains | (m/s) |
| V | = volume | (m ³) |
| x | = diamètre moyen de Rivière 1977 | (lg $\frac{\mu m}{100}$) |
| z | = profondeur | (m) |
| Z | = indice d'arrondi de Cailleux et Tricart 1959 | (-) |
| α | = coefficient de Drucker-Prager | (-) |
| ε | = déformation spécifique | (%) |
| γ | = poids volumique | (kN/m ²) |
| γ | = coefficient de tension superficielle gaz-eau | (N/m) |
| μ | = viscosité dynamique de l'eau | (kg/m•s) |
| ν | = viscosité cinématique de l'eau | (m ² /s) |

| | | | |
|-------------|---|-----------------------------------|----------------------|
| ρ_f | = | masse volumique de l'eau | (kg/m ³) |
| σ | = | contrainte normale | (kN/m ²) |
| τ | = | contrainte tangentielle | (kN/m ²) |
| \emptyset | = | $\lg 2 (d/d_0)$ où $d_0 = 1$ mm | (-) |
| \emptyset | = | angle de frottement interne | (°) |
| ψ | = | coefficient de rugosité des pores | (-) |

I. INTRODUCTION

Ce travail tente de créer un pont entre deux approches fondamentalement différentes, celle de l'ingénieur et celle du géologue.

Classiquement, l'ingénieur s'intéresse à la physique des matériaux avec

- ses lois de déformations,
- ses critères de rupture,
- ses essais standardisés en laboratoire.

Le géologue procède en naturaliste avec

- ses observations "sur le terrain",
- ses reconstitutions du passé et ses projections de l'avenir.

Nous allons utiliser ces deux démarches pour l'étude d'un spectaculaire exemple de déformations qui ont affecté les sédiments du delta proglaciaire à Granges, dans la vallée de la Broye.

Les aspects sédimentologiques du delta et de son bassin versant sont d'abord traités. Puis nous exposons tous les mécanismes possibles de déformation dans leur contexte sédimentaire. Nous concluons sur la présentation des conditions de dépôts qui ont conduit à la genèse des déformations de Granges.

II. CONTEXTE GEOLOGIQUE DU SITE DE GRANGES

1. Cadre général

Grâce à une étude menée sur l'ensemble du bassin de la Broye, A. Parriaux 1979 et 1981 a retracé la genèse du delta de la Lembe près de Granges. Nous reprenons ici sa présentation, qui a gardé toute sa validité (Parriaux 1979 p. 421-422).

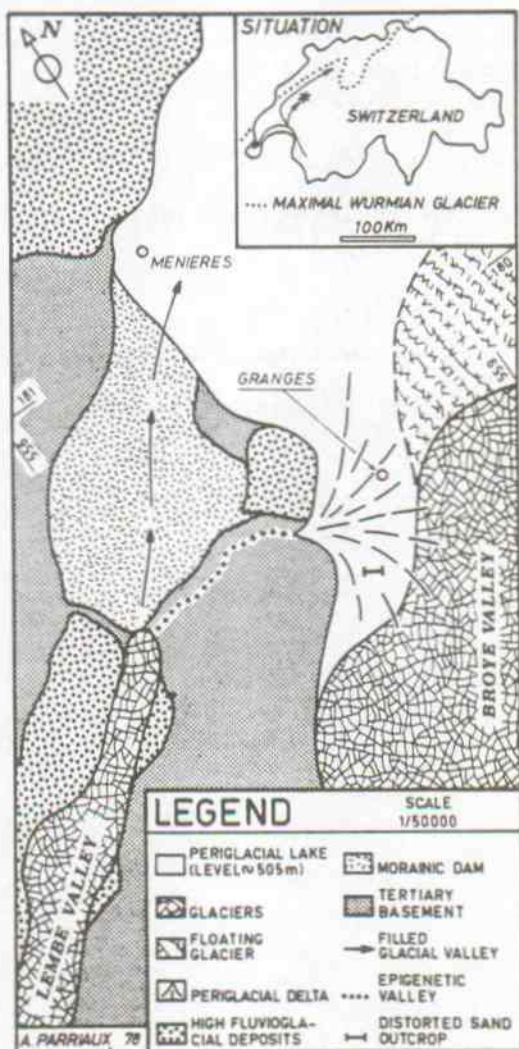


Fig. 1: Paleogéographie locale du delta de Granges (Parriaux 1979 p.422)

During the fusion, the lacustrine level has lowered. The lakes always occupied vaster areas in front of the glacier. That is during one of the last glacio-lacustrine periods that the delta of Granges-Marnand has taken form.

In the western part of Swiss Plateau near lemanic depression, the Broye basin diverts the water to the north through the lakes of Morat and Neuchâtel. The rocky substratum is entirely molassic. The north and south parts are cut in shaly and sandy rocks whereas the center part only erodes sand- and siltstones. Consequently the nature of quaternary deposits is very sandy and silty.

During quaternary glaciations, the Broye valley was located in the inner part of the country occupied by the Rhône glacier which divided into two tongues. The first one flew to Lyon and the other one northeastwards in the direction of Soleure. This last one occupied two different glacial valleys which were separated by the Jorat-Vully molassic Plateau:

- in the northwest, the valleys of Venoge, of Orbe-Thielle, of Lake of Neuchâtel and the Aar valley;
- in the southwest, the valleys of Broye then of Aar.

The Broye valley was fed with ice by two transfluence cols in the edge of the Lemman, then it guided the ice flow creating important troughs separated by steps.

During the last retreat, periglacial lakes have surrounded the melting tongue deposition deltaic terraces actually perched on slopes.

The periglacial lake in which the Granges delta has been sedimented, extended over the sides and in front of the Broye glacier. In the north, it rested probably against the tongue of the Neuchâtel Lake glacier which was flowing into the low Broye valley by transfluence over Estavayer depression.

The water level was determined by morphology and sediments of the delta at 505 meters.

At this retirement period, an ice tongue still filled the bottom of the main valley (Fig. 1).

Westwards, the secondary glacial valley of Lembe was dammed by a morainic body which impeded the natural water flow northeaster. This melt-water which was accumulated behind the dam, created another periglacial lake with a level about 560 meters. In the beginning, its water flew out over the morainic dam until such time as it made its way towards east to the 505 m lake. An epigenetic course was rapidly eroded through the thin molassic ridge. The flow carried a great solid discharge which occurred from the freshly deposited material of Lembe valley. Little by little an important delta has grown at the outlet of the new Lembe river.

Et vers la fin du dépôt, des déformations se produisent rapidement sur une aire de grande extension. Plus tard, lors du retrait du glacier de la Broye, le niveau du lac proglaciaire de la Broye baisse et se maintient à une altitude de 480 m. Il se dépose alors un nouveau delta à l'embouchure de la Lembe qui s'emboîte dans le premier. Peu à peu le lac se comble et le fond de la vallée de la Broye devient la plaine alluviale que l'on connaît actuellement.

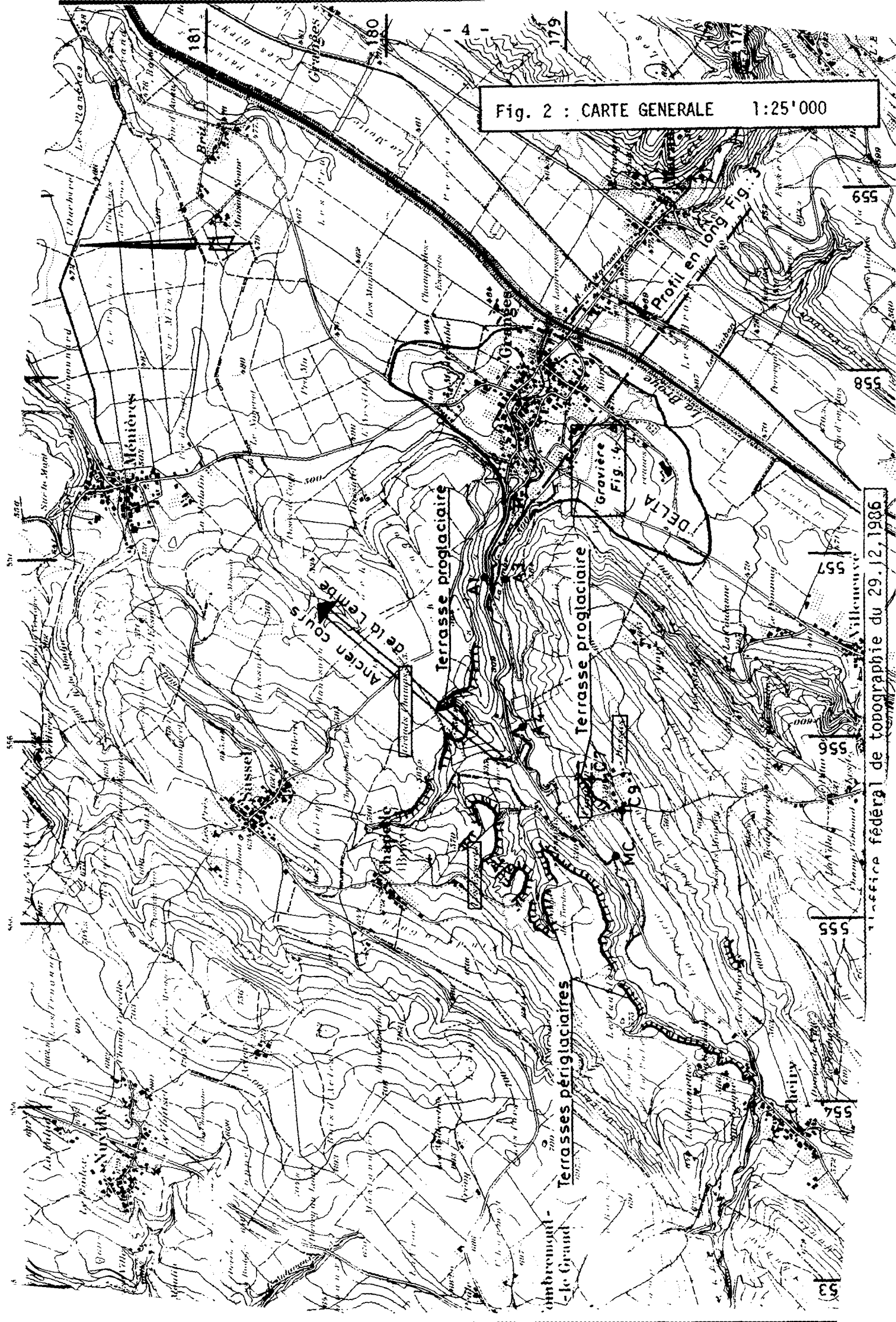
Nous allons reprendre en détail les caractéristiques du bassin versant et du delta.

2. Le bassin versant de la Lembe

Les caractéristiques du bassin versant de la Lembe lors de la formation du delta de Granges ont été obtenues grâce à deux approches:

- étude hydrologique sommaire de la Lembe
- description des formations traversées par la Lembe.

Fig. 2 : CARTE GENERALE 1:25'000



Office fédéral de topographie du 29.12.1986

2.1. Description des formations traversées par la Lembe

La cartographie géologique de la vallée de la Lembe a été menée par Briel 1962. Voici une présentation reposant sur nos observations de haut en bas (fig. 2 p. 4 et tableau 1 p. 9).

a) Les terrasses proglaciaires

Ces terrasses peuvent être comparées à de petits deltas perchés: on y retrouve des fore-sets sablo-graveleux et des top-sets sablo-limono-argileux en fines laminations centimétriques ou millimétriques. Notons que le matériel d'origine rhodanienne est particulièrement abondant dans la fraction graveleuse (annexe I: fig. 49 p. 106).

b) Les alluvions

Seuls les dépôts de Ménières sont actuellement visibles. Tous ceux de la vallée de la Lembe ont été balayés par la vidange du lac lors du creusement du cours épigénétique. Ils se retrouvent ainsi dans le delta de Granges.

Une fois le lac vidé, des alluvions se sont redéposées, tapissant l'actuel talweg de la Lembe (fig. 3 p. 7).

c) Les moraines

Les moraines bordières

Ces dépôts constitués de graviers très sableux et très limoneux, argileux, peu compacts, forment des arêtes très molles à mi-hauteur ou près des sommets des versants de la vallée (annexe I: fig. 50 p. 107).

La moraine de fond

Ce matériau entraîné, broyé et compacté par la glace, se retrouve dans toute la vallée de la Lembe. Toutes les classes granulométriques sont représentées, mais avec une dominante sableuse. Vu son importance, ce dépôt sera retraité dans le chapitre Sédimentologie.

d) Le substratum

Le "Burdigalien"

Cet étage stratigraphique de la "Molasse marine supérieure" ne possède ici que des grès fins à grossiers. Le pendage y est voisin de l'horizontale. Le soubassement aquitanien se rencontre près de Cheiry vers la cote 570 m (annexe 1, fig. 48 p. 105).

L'"Aquitaniien"

L'"Aquitaniien" rattaché à la "Molasse d'eau douce inférieure" constituait l'écrou oriental du lac proglaciaire de la Lembe. Ses alternances de grès moyen à fin et de marnes brunâtres ou bigarrées à charbon ont alors subi la forte érosion du cours épigénétique de la rivière et ont contribué grandement à l'imposante accumulation du delta de Granges (voir chapitre Sédimentologie).

2.2. Etude hydrologique sommaire de la Lembe

Si l'actuelle Lembe draine un territoire de petite taille - env. 25 km² -, tel ne fut pas le cas lors de la formation du delta de Granges. La rivière qui débouchait de la langue glaciaire constituait un des nombreux exutoires du glacier du Rhône.

Régime des crues: Pour aborder le rôle de la couverture végétale sur les crues, nous avons pratiqué une analyse palynologique du niveau le plus fin des top-sets de Granges (voir situation de l'échantillon fig. 8 p. 16); aucun pollen n'a été détecté. Nous pensons ainsi que les eaux de ruissellement lors de précipitations subissaient peu de rétention par la végétation, et qu'elles devaient se précipiter dans le fond de la vallée car ses flancs étaient et sont restés assez raides: les crues devaient être très violentes.

Débit solide: Grâce au profil en long de l'actuelle Lembe et de ses affluents (fig. 3), on se rend compte que la Lembe devait être un tumultueux torrent qui traverse surtout des formations gréseuses, mais il

Fig. 3: Profil en long de la Lembe et de ses affluents

est illusoire de quantifier son débit solide lors de la vidange du lac; ici, nous ne pourrions faire que des hypothèses sur tous les paramètres nécessaires à ce calcul (pente, largeur et profondeur de la rivière, débit, etc.).

L'érosion fluviatile était couplée à des phénomènes d'instabilité des versants à l'aval de Coumin Dessous, qui sont encore actifs aujourd'hui. Les masses glissées devaient obturer momentanément l'étroit cours de la rivière jusqu'au déclenchement d'une violente débâcle.

Pluviosité: A l'époque du retrait glaciaire dans la vallée de la Lembe, période où une bonne partie du Plateau était encore recouverte de glace, les précipitations sous forme de neige et de pluie devaient largement dépasser les 950 mm annuels que nous connaissons actuellement dans cette région (Parriaux 1981 p. 26).

Force nous est de constater que les informations hydrologiques méritent vraiment d'être qualifiées de sommaires.

| Événement | Transport | Dépôts et leur situation |
|--|-----------|---|
| Avance du glacier de la Lembe: érosion du substratum molassique | → | moraines alluvions - Menières terrasses périglaciaires - Les Esserts (555,5/179,5/580) |
| Obturation de la vallée de la Lembe par moraine latérale du glacier de la Broye | → | moraines - bordières Nervaux (554,5/179,3/650) - de fond Coumin Dessous (555,3/178,8/530) |
| Retrait du glacier de la Lembe | → | Terrasses proglaciaires - Grands-Champs (556,5/179,5/560) - Coumin Dessus (555,7/178,8/560) |
| Erosion du cours épi-génétique de la Lembe dans substratum aquitain par débordement du lac de la Lembe | → | <u>Delta de Granges</u> (557,5/179/505) $V_0 = \text{env. } 80.10^6 \text{ m}^3$ |
| Vidange progressive dans lac périglaciaire de la Broye | → | Dépôts lacustres dans la vallée de la Broye |
| Abaissement du niveau du lac de la Broye: érosion du delta et de la vallée de la Lembe | → | Alluvionnement de la vallée de la Broye |

Tableau 1: Chronologie des dépôts de la Lembe

3. Le delta de Granges

3.1. Généralités

Actuellement, le delta se présente dans la plaine de la Broye sous la forme d'un grand cône visible de Vuarennas à Montrouble. Il est éventré par la Lembe. Long d'env. 2000 m, large de quelque 1000 m, son épaisseur maximale estimée à partir de données géoélectriques (Parriaux 1981) avoisine les 40 m. Ainsi le volume de matériaux déposés par la vidange du lac de la Lembe atteint très approximativement les 80 mio m³, dont le huitième seulement provient de l'érosion de l'écrou aquitainien (fig.3 p.7). En admettant arbitrairement que la purge du lac ait duré 1000 ans, on obtient un taux de sédimentation moyen d'env. 25 mm par an et par m², ce qui est plausible. La lithification des dépôts est pratiquement nulle, ainsi le delta n'a pas été le siège de circulation d'eau souterraine importante. Une fois exondé, aucun niveau sourcier n'a dû se manifester au-dessus de la cote 485 m (absence d'horizons de "grèpe" et de pyrolusite).

3.2. Caractéristiques du bassin récepteur

Le lac proglaciaire de la Broye était limité à env. 7 km au nord par la moraine d'Estavayer. De la glace morte devait le recouvrir partiellement, empêchant ainsi la formation de grosses vagues. Les courants de densité étaient probablement fréquents, induits par les violentes débâcles qui expulsaient les matériaux glissés dans le cours épigénétique.

3.3. Les top-sets

Les top-sets possèdent deux membres bien individualisés: Le membre supérieur, épais d'env. 3 m, se distingue par ses strates sableuses et limoneuses, il est l'objet des déformations pénécontemporaines que nous analysons plus loin. La partie inférieure se rapproche, par sa granulométrie graveleuse, des fore-sets sous-jacents (fig. 5 p. 13 et 6 p.14); elle est parfois absente (fig. 7 p. 15).

Tableau 2: Description sédimentologique des top-sets de Granges

| TOP-SET | | |
|---------------------------------------|---|----------------------|
| Epaisseur totale | ≤ 6 m | |
| M.O. (charbon) | R - A (certainement d'origine molassique) | |
| Pollen et faune | A | |
| Bioturbation | A | |
| Dépôts exondés (barres, marécages) | A | |
| Granulométrie | <u>sable fin</u> | <u>limon sableux</u> |
| Epaisseur des laminations | 0,5 - 1,5 cm | 0,5 - 1,5 mm |
| Epaisseur des couches | 5 - 100 cm | 1 - 5 cm |
| Granoclasement | | |
| -croissant vers le haut | (passage graduel du limon au sable) : C | |
| -croissant vers le bas | (passage graduel du sable au limon) : C | |
| Laminations parallèles | D : millimétriques | D : millimétriques |
| Laminations obliques | R | A |
| Rides de courant | C | A |
| Rides de vagues | A | A |
| Mudstones | C: molasse marneuse et lambeaux de limons sableux | A |
| Cut and fill | C | C |

Légende: A = absent
R = rare
C = commun
D = dominant

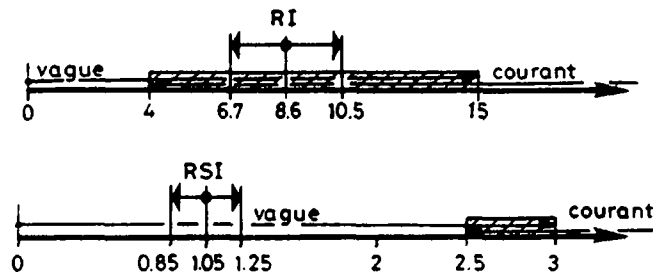
Tableau 3: Description sédimentologique des fore-sets de Granges

| FORE-SETS épaisseur totale: > 25 m | |
|---------------------------------------|---|
| granulométrie | limon (R) - sable (D) - gravier (C) blocs (<60 cm) (C) |
| matière organique | A |
| bioturbation | A |
| épaisseur des couches de sable | 10 - 300 cm |
| épaisseur des couches de gravier | 20 - 200 cm |
| biseautage des strates | C |
| laminations parallèles | sable : C ; gravier : C |
| rides de courant | A |
| cut and fill | C |
| granoclasement | |
| -croissant vers le haut | C |
| -décroissant vers le bas | C |
| tectonique synsédimentaire | C : paquets glissés C : failles |

Légende: A = absent R = rare C = commun D = dominant

Les principales observations sédimentologiques se rapportant au membre supérieur sont réunies au tableau 2 p. 11: la présence des rides de vagues peut étonner, les indices de Tanner portent pourtant à croire à leur existence (tableau 4). En fait, ces rides ne comportent pas de structure en chevrons. C'est donc bien le courant qui les a façonnées.

Tableau 4: Rides de courant des top-sets de Granges
(indices de Tanner: moyenne + écart-type)



Longueur moyenne des rides: 96 mm \pm 16 mm

Situation des comptages: voir fig. 8 p. 16

Nombre de mesures: 27

RI = ripple index = $\frac{\text{longueur d'une ride}}{\text{sa hauteur}}$

RSI = ripple symmetry index = $\frac{\text{longueur de la projection horizontale du côté amont (stoss)}}{\text{longueur de la projection horizontale du côté aval (lee)}}$

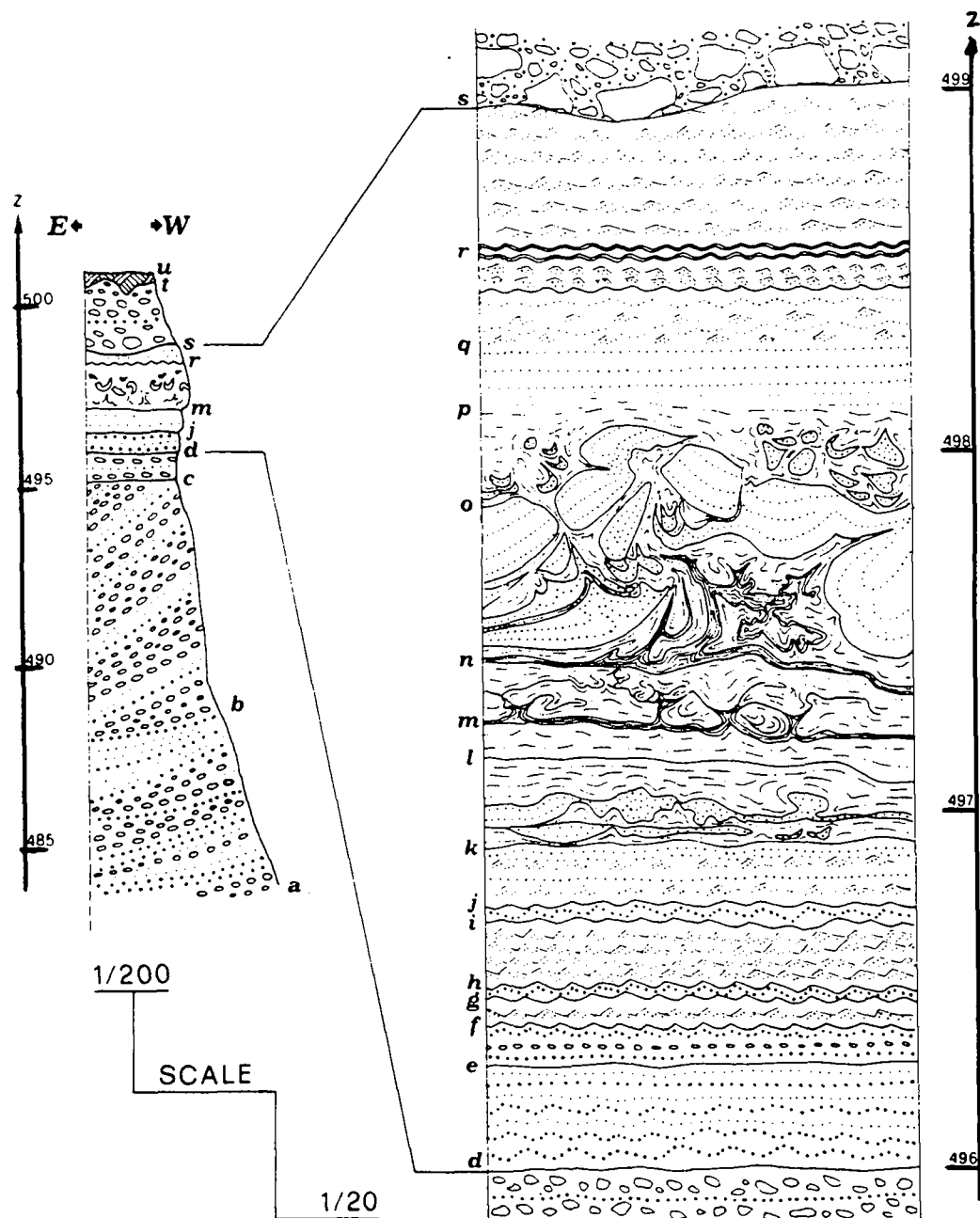
Les top-sets ont naturellement leur toit sillonné par les chenaux de la Lembe, qui les a fortement entaillés (fig. 9 p. 16).

3.4. Les fore-sets

Sous la couverture des top-sets, nous trouvons les imposants fore-sets du delta (fig. 5, 7 et 10, tabl. 3 p.11). Composés essentiellement de sables et de graviers, ils plongent vers la vallée de la Broye avec des pendages compris entre 10° et 35°.

Quelle ne fut pas notre surprise de découvrir d'importantes failles normales subverticales traversant les fore-sets et disparaissant dans les top-sets graveleux. Nous les attribuons à la tectonique glaciaire comme le suggère la figure 11 p. 19.

Les bottom-sets n'ont pas été touchés par les forages à la tarière, ainsi les fore-sets dépassent 25 m d'épaisseur.



(a-b) : deltaic gravel with low dip. (b-c) : gravely foreset beds. (c-d) : gravely horizontal topset. (d-e) : bedded middle sand with few ripples. (e-f) : coarse sand with fine gravel. (f-g) : fine sand with ripple, paleocurrent → E. (g-h) : ripple laminated middle sand → E. (h-i) : fine sand with ripple → E. (i-j) : cross bedded middle sand → E. (j-k) : fine and middle sand with ripple → E. (k-l) : small convoluted fine sand and sandy silt, convolution disappear upwards. (l-m) : very fine sand a little deformed. (m-n) : silty sand with small but very well formed convolutions. (n-o) : main convoluted bed with big deformation structures in fine sand, silt and sandy silt. (o-p) : Small scale convoluted f. sand and silt. (p-q) : undeformed horizontal bedded fine sand. (q-r) : very fine sand with ripple, paleoc. → E at the base, → W at the top. (r-s) : fine sand with great wavelength ripple, paleoc. → E. (s-t) : coarse channel gravel, discordant. (t-u) : top soil.

Coord. 557'52/178'85/501

Fig. 5: Profil géologique 1 du delta de Granges (Parriaux 1979 p 423)

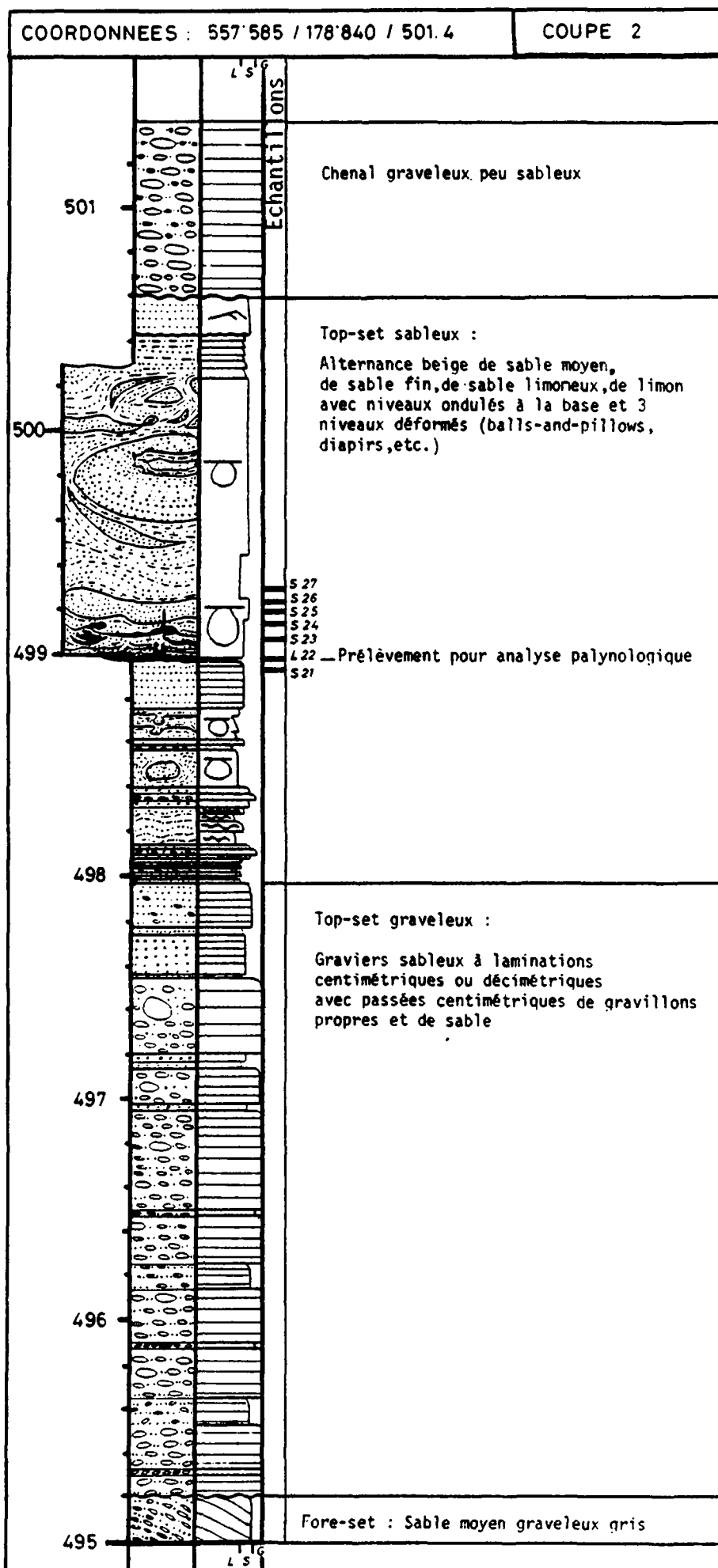


Fig. 6: Profil géologique 2 des top-sets de Granges

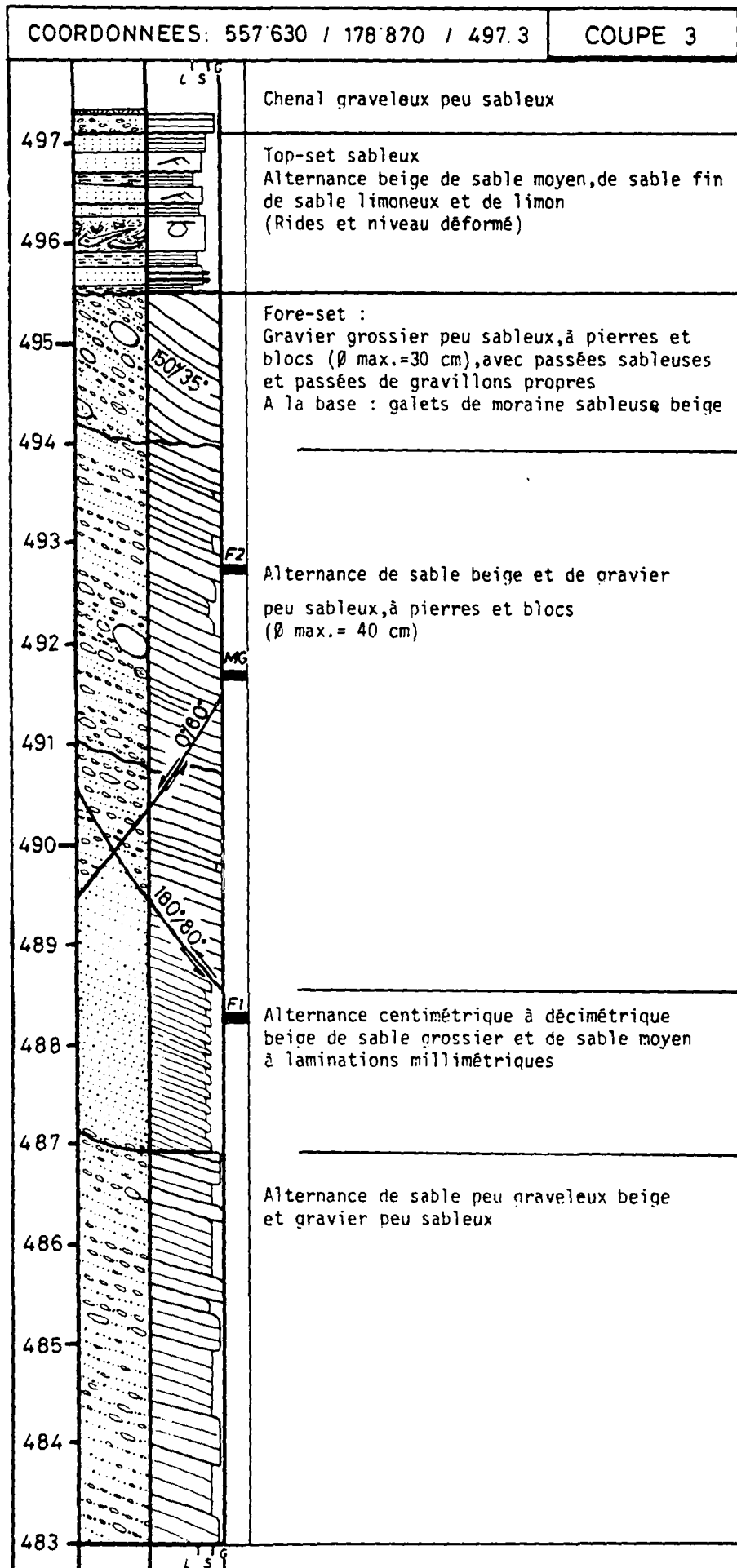


Fig. 7: Profil géologique 3 des top-sets et des fore-sets de Granges

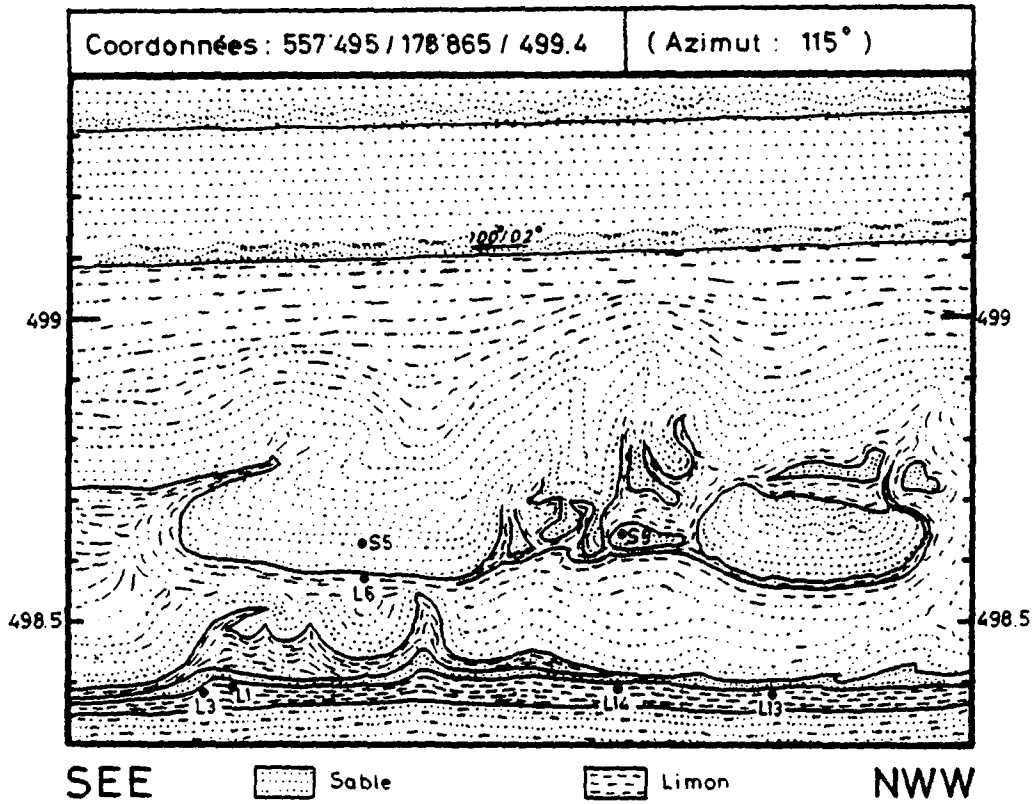


Fig. 8: Détail 4 des top-sets déformés de Granges

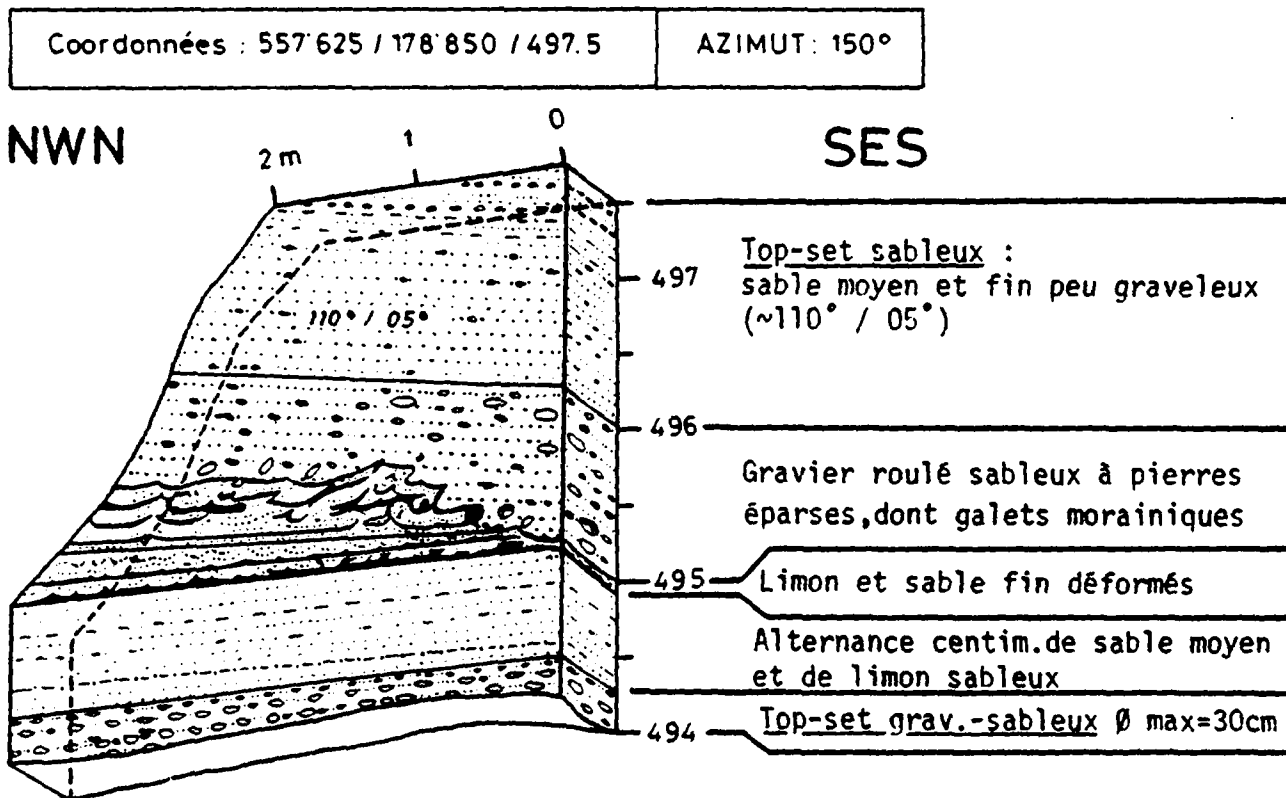


Fig. 9a: Profil géologique de la tranchée 5 à Granges

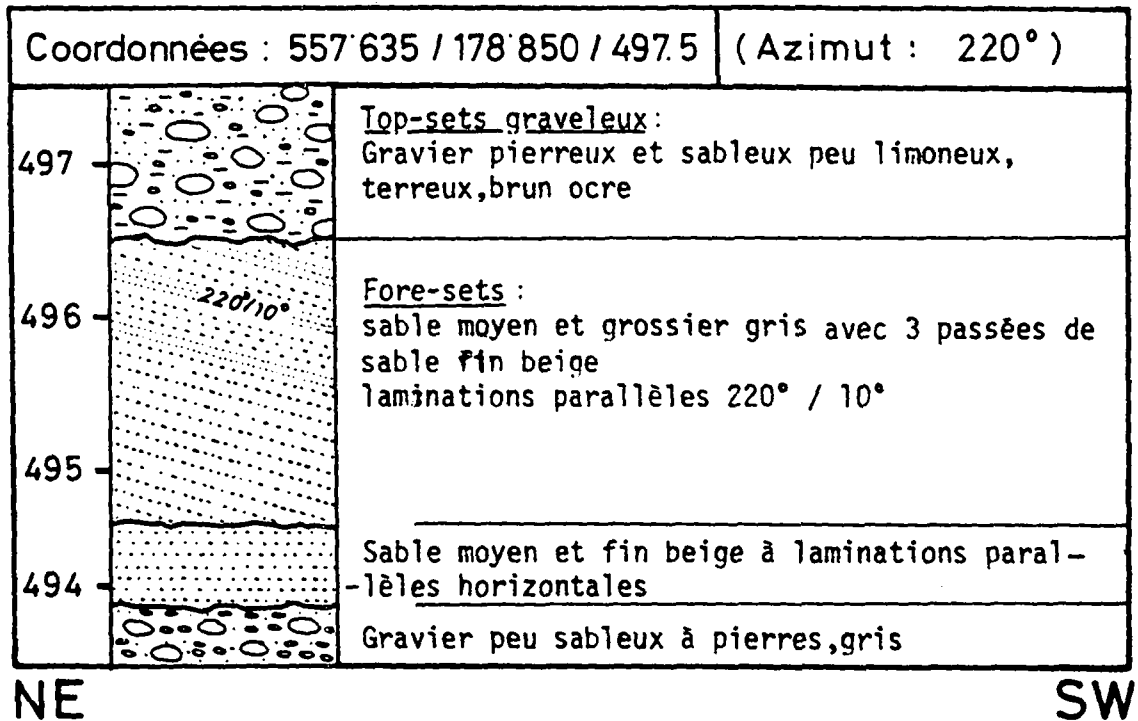


Fig. 9b: Profil géologique de la tranchée 6 à Granges

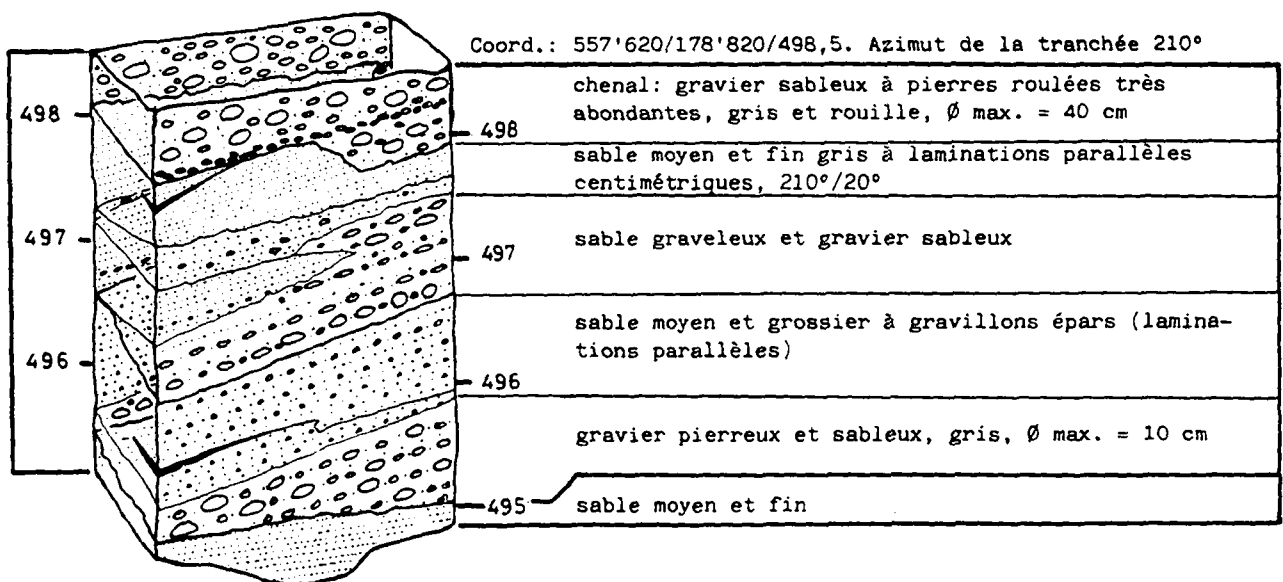


Fig. 9c: Profil géologique de la tranchée 7 à Granges

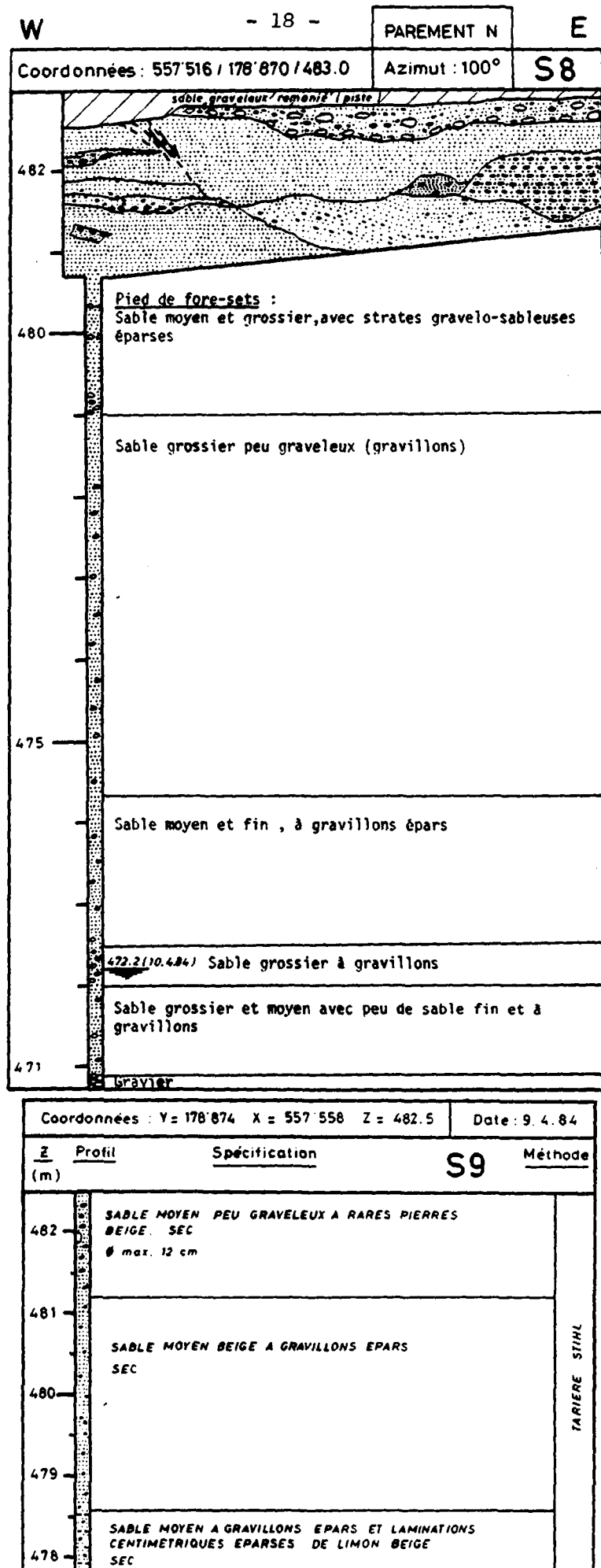


Fig. 10: Profil géologique des sondages 8 et 9 à la carrière à Granges

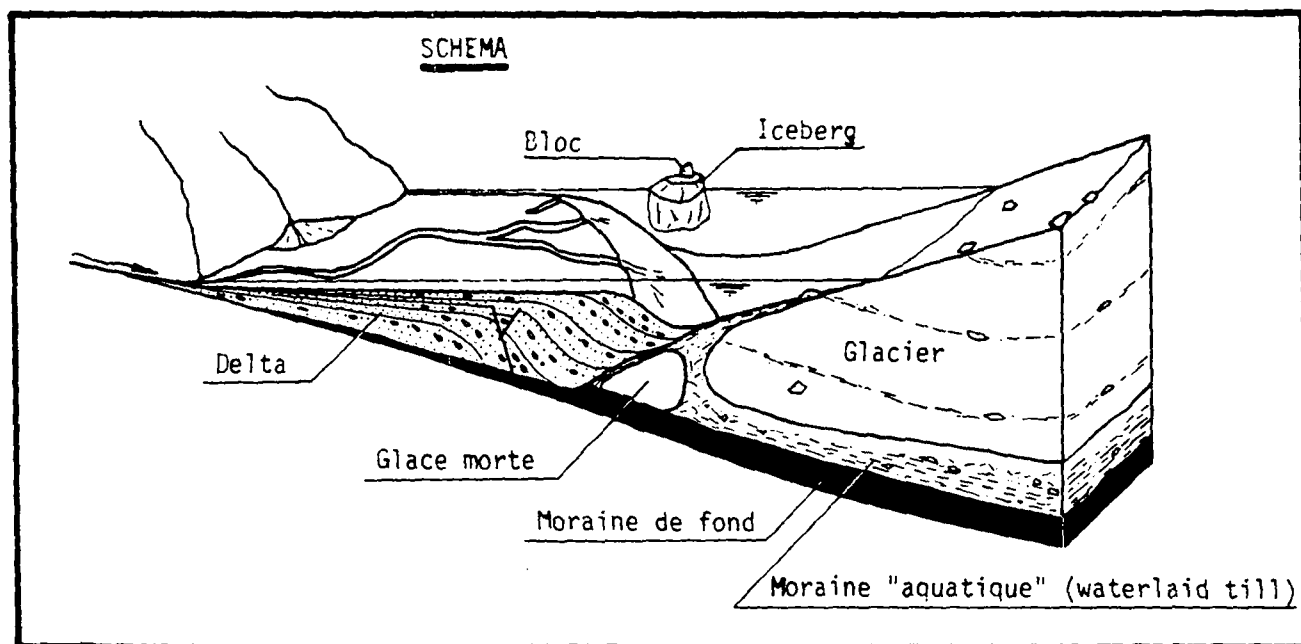


Fig. 11: Tectonique synsédimentaire due au retrait glaciaire

III. SEDIMENTOLOGIE

1. Généralités

Le sédimentologue confronté aux mécanismes de dépôts dans l'eau, est naturellement tenté de recourir aux lois de l'hydraulique. La plupart de celles-ci sont établies pour des conditions d'équilibre: l'écoulement est permanent, uniforme et irrotationnel. Ces conditions ne favorisent pas la formation des dépôts. Et comme le géologue s'attache à l'étude des accumulations de sédiments, ses observations portent essentiellement sur un état de déséquilibre, par excès de sédiments transportés.

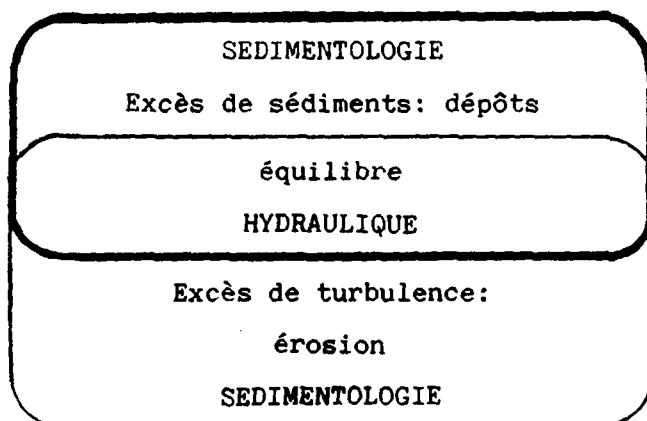


Fig. 12: Relation entre l'hydraulique et la sédimentologie

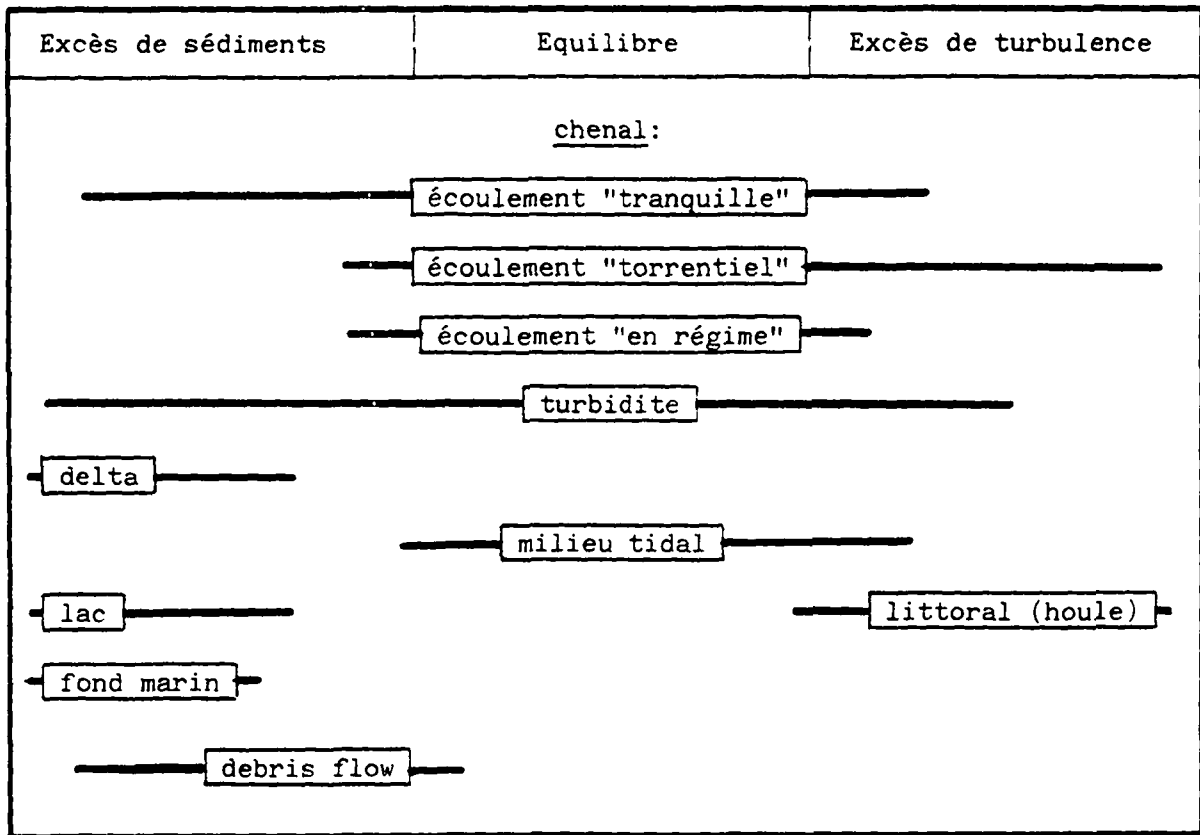
Il est possible ainsi de délimiter dans quel milieu sédimentaire l'hydraulique trouve son plus vaste champ d'application: celui des écoulements chenalisés (tableau 5 p. 21).

Mais la grande difficulté réside dans la perception du facteur temps: le dépôt est là, fossilisé, et on ne pourra plus mesurer à quelle vitesse il s'est formé. Il est donc illusoire de vouloir retrouver tous les paramètres dépendant du temps, tels la vitesse de l'écoulement, ses composantes turbulentes, le débit solide, etc.

C'est pourquoi, le sédimentologue se tournera avec plus de succès vers des méthodes liées aux observations de détail des dépôts. Ces méthodes sont rappelées ci-dessous:

- Lever de coupes avec description des structures sédimentaires: leur géométrie, leur direction, etc.
- Méthodes complémentaires de laboratoire:
 - * Analyse minéralogique et pétrographique
 - * Etude des courbes granulométriques
 - * Morphométrie des graviers et pierres
 - * Morphométrie des sables de quartz
 - * Exoscopie des sables de quartz

Tableau 5: Classification des milieux sédimentaires selon leur régime



2. Etude comparative du bassin versant et du delta de la Lembe

Dans l'éventail des formations visibles dans la vallée de la Lembe, nous avons choisi les trois dépôts les plus typiques:

- le grès et la marne aquitanienne de Granges,
- la moraine de fond de Coumin,
- les fore-sets et les top-sets de Granges,

et nous allons les confronter aux méthodes complémentaires des sédimentologues.

2.1. Analyses minéralogiques et pétrographiques

2.1.1 Minéralogie des sédiments fins

L'étude des minéraux des différentes formations a pour but de mettre en évidence leurs caractéristiques spécifiques de dépôt.

Nous avons analysé quatre échantillons de l'Aquitaniien, un échantillon du Burdigalien, un de la moraine de Coumin, trois des top-sets et un des fore-sets (annexe 2) par voie chimique (procédure décrite à l'annexe 6.1 p.158) par diffractométrie aux rayons X, et par voie optique au microscope polarisant. Pour obtenir des résultats quantitatifs aux rayons X, nous avons eu recours à 3 étalons standards dont on a comparé la surface des pics (nombre de pulsions électriques) avec l'échantillon étudié. Toutes les méthodes de détermination n'ont pas pu être appliquées à chaque échantillon. Il est par exemple difficile d'identifier au microscope les caractéristiques optiques d'un minéral dont la taille est inférieure à 200 μm .

Nous avons pratiqué par ailleurs un traitement à l'acide chlorhydrique sur chaque classe granulométrique du sable aquitanien (échantillon A), nous obtenons ainsi la variation de la teneur en carbonates (éléments + ciment) en fonction du diamètre (tableau 6 p. 23).

Tableau 6: Variation de la teneur en carbonate d'un grès aquitainien A en fonction du diamètre (courbes granulométriques à l'annexe 2)

| Avant traitement à l'HCl | | | | Après traitement à l'HCl | |
|--------------------------|-----------------------------------|------------------------|--------|--------------------------|-----------------------------------|
| classe granulom. (mm) | pourcentage pondéral de la classe | % en CaCO ₃ | | classe granulom. (mm) | pourcentage pondéral de la classe |
| | | par classe | global | | |
| > 0,625 | 7,76 | 40,25 | 3,12 | > 0,625 | 0,88 |
| 0,5 - 0,625 | 10,91 | 26,95 | 2,94 | 0,5 - 0,625 | 7,73 |
| 0,31 - 0,5 | 38,86 | 20,20 | 7,85 | 0,31 - 0,5 | 36,39 |
| 0,25 - 0,31 | 10,71 | 18,77 | 2,01 | 0,25 - 0,31 | 15,00 |
| 0,20 - 0,25 | 8,64 | 20,83 | 1,80 | 0,20 - 0,25 | 12,08 |
| 0,12 - 0,20 | 10,22 | 20,45 | 2,09 | 0,12 - 0,20 | 12,97 |
| 0,06 - 0,12 | 5,13 | 22,42 | 1,15 | 0,06 - 0,12 | 5,84 |
| < 0,06 | 7,76 | 19,59 | 1,52 | < 0,06 | 9,11 |
| Σ | 100% | - | 22,49% | Σ | 100% |

$$\text{pourcentage par classe} = \frac{\text{Poids initial} - \text{Poids après traitement}}{\text{Poids initial de la classe}} \cdot 100$$

$$\text{pourcentage global} = \frac{\text{Poids initial} - \text{Poids après traitement}}{\text{Poids initial total}} \cdot 100$$

De ces analyses, il ressort:

- Le quartz domine dans tous les échantillons - jusqu'à 50% du poids total dans le grès aquitainien. Sa teneur est néanmoins peu variable (40-50%).
- Plus le sédiment est consolidé, plus sa teneur en carbonate est élevée (24% pour la moraine de Coumin, 22% pour le grès aquitainien altéré, 4% pour les sables deltaïques). Les carbonates du grès aquitainien sont répartis de façon égale dans chaque classe granulométrique, à l'exception de la fraction 315-500 μm, où ils sont 3 fois plus abondants (tableau 6). La courbe granulométrique obtenue après décalcification figure à l'annexe 2. Son allure est semblable à la courbe initiale, mais un peu décalée vers les fines.
- Les feldspaths sont le plus souvent saussuritisés (altération en épidote et zoisite), ils font le 20 à 25% de la masse de chaque échantillon.

- Les phyllosilicates sont peu abondants, ils représentent le 12 à 15% des marnes, de la moraine, des sables et limons deltaïques. La moitié de ce pourcentage est formée par la muscovite et la biotite. Notons que, dans les top-sets, la muscovite est concentrée dans la fraction de 100 à 160 μm . L'illite (1-4%), la chlorite (1-5%), la montmorillonite à CaMg (1-3%), sont les principaux constituants de l'autre moitié du pourcentage (absence de vermiculite et de kaolinite).
- La magnétite a été décelée partout grâce à un aimant.

En conclusion, l'analyse minéralogique ne révèle que peu de variations au sein d'un même bassin versant. Tous les dépôts portent l'empreinte de leur origine, les grès burdigaliens et aquitaniens. Et la teneur en carbonates traduit seulement leur degré de cimentation.

2.1.2. Pétrographie des dépôts grossiers

Des graviers et des galets ont été prélevés dans la moraine de Coumin et dans les fore-sets de Granges pour la détermination pétrographique (voir aussi morphométrie des galets, fig. 20 p. 41).

Pour une taille comprise entre 20 et 110 mm, la teneur en cristallins varie peu (24% à Coumin et 27% à Granges). On constate que plus la taille diminue, plus le pourcentage en cristallins augmente (partie grossière de F2: 12-44 mm: 35% de cristallins). Les cristallins sont représentés par des gneiss, des prasinites, des quartzites, du quartz d'origine filonienne, des conglomérats de type Verrucano et des granitoïdes du MontBlanc.

Les calcaires forment la population la plus nombreuse dans les fore-sets (60% pour la taille 20-110 mm dans le delta et 38% à Coumin). Ce sont des calcilutites noires parfois siliceuses.

Les grès calcaires constituent le meilleur indice de l'abrasion par le transport fluviatile ou glaciaire. On en trouve 38% à Coumin, provenant essentiellement des Flyschs préalpins. Ce pourcentage chute à 22% au F2 et 13% dans les fore-sets plus grossiers où l'Aquitaniens est le principal fournisseur.

Une fois de plus, l'analyse pétrographique met en évidence le rôle du transport glaciaire et fluviatile, par l'érosion des roches les plus friables et les plus gélives : les grès calcaires. Et la pétrographie est une bonne signature de l'origine des dépôts, tant par les roches cristallines que sédimentaires.

2.2. Courbes granulométriques

2.2.1. Introduction

C'est dans le domaine de la taille des grains que les sédimentologues ont poussé le plus loin leurs recherches.

De façon générale, nous pouvons relier les classes granulométriques aux milieux sédimentaires (cf tableau 7 p. 26) où l'on remarque que les sables et les limons sont communs à presque tous les dépôts, tandis que les argiles, les graviers et les blocs sont spécifiques à certains dépôts.

La première difficulté réside dans la prise d'échantillon (voir profil géologique, fig. 6 p. 14). Par exemple, tout prélèvement d'un dépôt fluviatile provient soit d'une figure sédimentaire du bed load, soit d'un dépôt granoclassé (suspended load).

La détermination de la taille des grains pose un certain nombre de problèmes, liés à la technologie de mesures. Une abondante littérature leur est consacrée (voir Rivière, 1977, Blatt et al, 1980, p. 58). Le tableau 8 p. 26 donne un aperçu des méthodes courantes. Celles-ci ne permettent qu'une appréhension indirecte de la taille réelle des grains au travers des paramètres de mesure. C'est pourquoi l'expérience montre que l'allure des courbes granulométriques est fortement influencée par la méthode utilisée (Reed et al, 1975), car les caractéristiques des grains telles leur géométrie, l'état de leurs angles ou de leurs faces, leur densité, influent directement sur les résultats des mesures.

Pour notre part, nous avons choisi les méthodes les plus courantes, soit le tamisage et l'aréomètre, car elles sont bien adaptées pour l'étude des sables et des limons peu argileux (SNV 670 814 et 670 816).

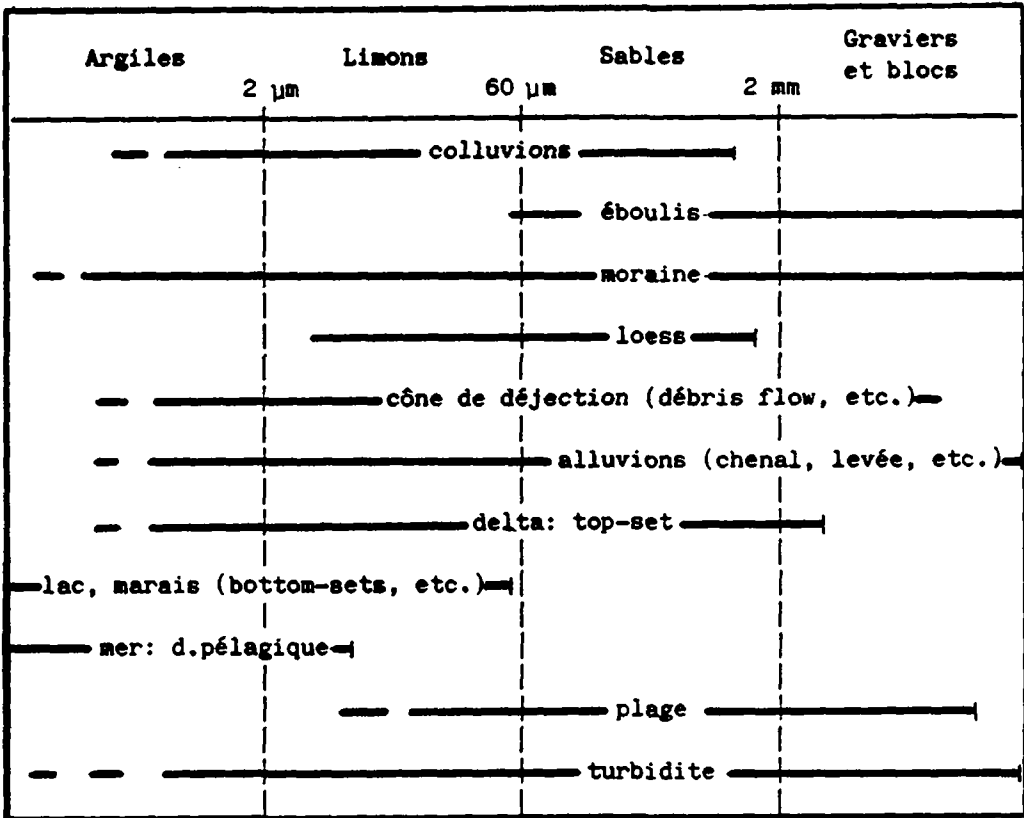


Tableau 7: Relation entre la taille des sédiments et le milieu de dépôt

| Méthode | Paramètres de mesure | Application | Principale source d'erreurs |
|-----------------------------|--|-----------------|---|
| 1. Tamisage | poids sec = f (d _{trou}) | B,G,S | pas d'information sur la forme exacte des grains |
| 2. Aréomètre | densité = f (temps) | M,C | forte concentration initiale influençant la viscosité |
| 3. Pipette d'Andreasen | poids sec = f (temps) | M,C | perturbations causées par prélèvements |
| 4. Comptage en lame mince | d _{apparent} | S,grès | pas d'information sur le volume des grains |
| 5. Balance de sédimentation | poids immergé = f (temps) | S,M,C | entraînement des particules fines par chute des particules grossières |
| 6. Elutriateur | d _{chute} = f (vitesse du courant) | S,M | turbulence du courant |
| 7. Séparateur centrifuge | poids immergé = f (vitesse de rotation) | C | densité non uniforme |
| 8. Coulpomètre | d = f (résistivité) | C | floculation provoquée par ionisation |
| 9. Néphélométrie | d = f (densité optique au laser, aux rayons X, etc.) | C industriel | péetrographie non uniforme |

B = blocs G = gravier S = sable M = limon C = argile d = diamètre

Tableau 8: Aperçu des méthodes de détermination de la courbe granulométrique

2.2.2. Allure des courbes granulométriques

Les résultats des mesures sur la taille des grains ont fait l'objet de représentations très diverses, toutes plus ou moins influencées par les statistiques. L'annexe 2 en fait l'inventaire (tableau 17 p. 110).

Chaque mode sous-tend une interprétation sédimentologique particulière.

Nous avons tenté de vérifier ces déductions en reprenant la méthodologie de:

| | |
|-----------------|------|
| D. Doeglas, | 1946 |
| L.R. Kittleman, | 1964 |
| A. Rivière, | 1977 |
| G.S. Visher, | 1969 |

L'annexe 2 indique aussi la procédure à adopter pour chaque diagramme.

On y trouve les courbes granulométriques des échantillons suivants:

| | |
|--|--------------|
| - grès de l'Aquitaniien (A) | : 3 analyses |
| - marne de l'Aquitaniien (A) | : 1 analyse |
| - moraine de fond de Coumin (MC) | : 1 analyse |
| - galet mou morainique des fore-sets de Granges (MG) | : 1 analyse |
| - top-set du delta de Granges: limons (L) | : 6 analyses |
| - top-set du delta de Granges: sables (S) | : 8 analyses |
| - fore-set du delta de Granges (F) | : 2 analyses |

A) Approche Doeglas

Déductions sur la capacité du transport fluviatile.

Application à notre étude

Nous avons pu reconnaître le type T (allure concave) et les mélanges S+T, R+S et R+S+T (voir annexe 2 tableau 23 p. 131).

En dépit d'une approche très qualitative, la concordance entre les interprétations de Doeglas et le cadre sédimentaire de nos échantillons est bonne, car cette procédure est fondée sur les relations entre les classes granulométriques et les milieux de dépôts (tableau 9 p. 30). Elle a le mérite de prendre en compte la stratification et de rester générale.

B. Approche Kittleman

Mise en évidence des dépôts clastiques.

Application à notre étude

Du report graphique des figures 55 à 62 de l'annexe 2, nous constatons que les échantillons S24, S27 et F1 se caractérisent par une allure rectiligne. On pourrait donc déduire que ces sédiments sont d'origine clastique, ce qui n'est malheureusement pas le cas (tableau 9 p. 30).

Les échantillons des limons 1, 3, 6, 13, 14 ont été analysés deux fois à l'aréomètre. Leurs domaines de variation sont présentés dans la figure 53 p. 117 de l'annexe 2. Ces variations sont loin d'être négligeables, puisqu'elles peuvent atteindre 5% du pourcentage pondéral. Cette imprécision correspond à l'ordre de grandeur constaté par Kittleman pour le tamisage. Elle est ainsi à imputer à la méthodologie de mesures.

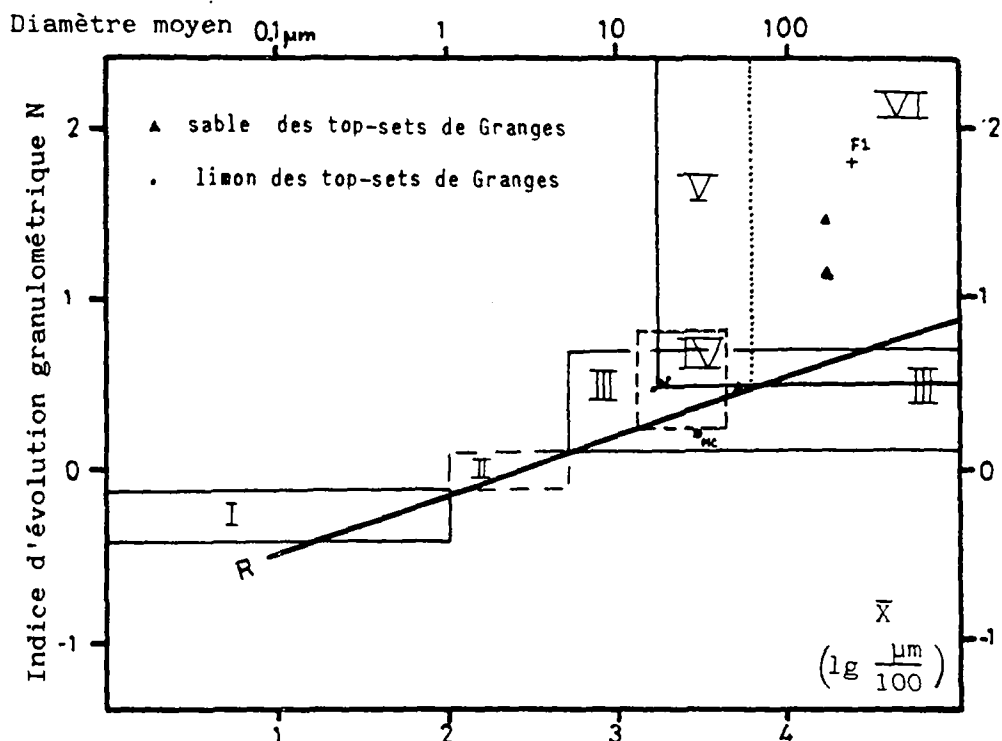
C. Approche Rivière

Equation mathématique de la courbe granulométrique à l'aide de 3 paramètres.

Application à notre étude

Le calcul des paramètres de l'équation mathématique exige la connaissance du pourcentage pondéral à $0,06 \mu\text{m}$, que seule la pipette d'Andreasen peut donner. Nous avons néanmoins tenté ce calcul en supposant que pour un diamètre équivalent de $0,1 \mu\text{m}$, le pourcentage pondéral valait 1/10 de celui qu'on a obtenu pour $1 \mu\text{m}$. Nous avons aussi utilisé des abscisses réduites même si le pourcentage pondéral pour $X = 0,8$ est bien inférieur à 1%.

Fig. 13: Classification des sédiments par les indices \bar{X} et N
(Rivière, 1977)



Légende: R : droite de régression $N_{th} = 0,3248\bar{X} - 0,82509$
I-VI: domaines sédimentologiques (voir tabl.21, p.120, annexe 2)

L'interprétation sédimentologique n'est pas très satisfaisante. Rivière voit par exemple des dépôts éoliens fins dans les top-sets limoneux (tableau 9 p. 30). La comparaison des courbes granulométriques expérimentales et mathématiques révèle une assez forte divergence: les 3 paramètres de Rivière ne permettent pas de couvrir la gamme de variation des courbes granulométriques.

Nous avons alors tenté de mettre en équation 2 exemples caractéristiques: le sable deltaïque S5 et la moraine de fond de Coumin MC. Six fonctions différentes ont été appliquées, qui balayent les possibilités de fonction logarithmiques, exponentielles et polynomiales (annexe 3). On constate que seul un grand nombre de variables, présentes par exemple dans une régression polynomiale, donne une bonne corrélation. La signification sédimentologique de chaque paramètre est alors perdue.

Tableau 9: Synthèse des déductions sédimentologiques à partir des courbes granulométriques

| | | KITTLEMAN 1964 | DOEGLAS 1946 | RIVIERE 1977 | VISHER 1969 |
|------------------|--|--|--|--|--------------------------------------|
| AQUITANIEN | A1 | non clastique | dépôts côtiers, tidaux, de mer intérieure ... | non défini à cause de la diagenèse (calcite néoformée) | fluviatile |
| | A3 | | | | |
| MORAINE | MC MG | non clastique | argiles fluv. moraine, ... | non défini | milieu non reconnu |
| DELTA DE GRANGES | Top-set | non clastique | eau stagnante: lacs, ... | dépôts éoliens fins | hors du domaine de validité |
| | | | | | |
| | S 5 S 9 S21 S23 S24 S25 S26 S27 | non clastique non clastique non clastique non clastique clastique non clastique non clastique clastique | dépôts côtiers, tidaux, de mer intérieure, d'estuaire | structures sédimentaires fluviatiles (s.s.f.) | fluviatile ou dune éolienne |
| Fore-set | F1 F2 | clastique non clastique | lit de rivière | s.s.f. non reconnu | fluviatile hors dom. val. |

D) Approche Visher

Mise en évidence des types de transports fluviatiles.

Application à notre étude

Cette approche est fondée sur le postulat qu'une courbe granulométrique est composée de sous-populations gaussiennes et tronquées. Le dépôt est ici traité au sens statistique comme le résultat d'un grand nombre de prélèvements à un milieu. Il est alors constitué par la somme d'évènements élémentaires ayant lieu dans des conditions uniformes et stables.

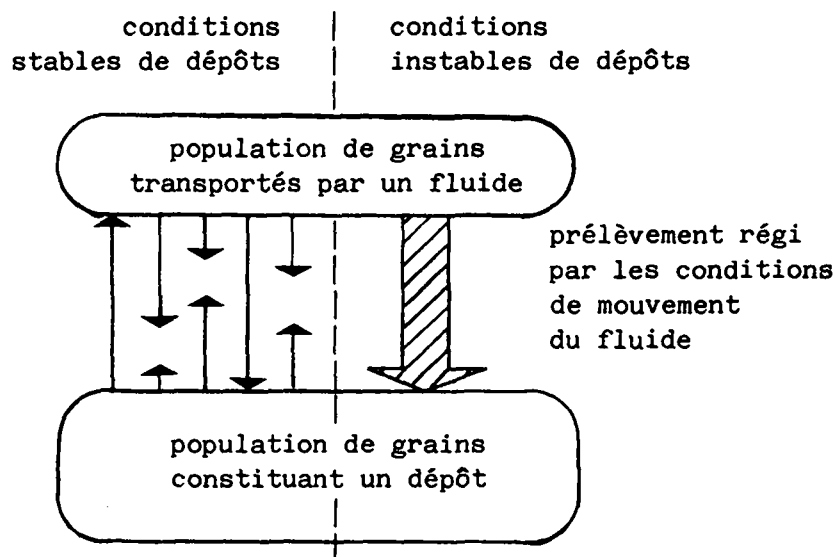


Fig. 14: Relation entre les populations de grains transportés et déposés

Grâce aux points de troncatures des courbes et aux pourcentages respectifs de chaque sous-population, on attribue par exemple les courbes granulométriques de l'Aquitaniien et des fore-sets F1 à des dépôts fluviatiles, tandis que les sables des top-sets peuvent appartenir soit au milieu fluviatile, soit à une dune éolienne (tableau 9 p. 30).

L'usage des ordonnées gaussiennes met en valeur les extréma, là où les informations ne sont pas toujours précises; du côté des grossières, par exemple, le nombre de grains devient petit.

En général, les conditions uniformes et stables, nécessaires pour un traitement statistique, ne sont pas remplies: seuls les éboulis, les dépôts pélagiques et les moraines de fond connaissent une formation lente, plus ou moins à l'abri des événements exceptionnels tels que crues, débâcles ou tempêtes. De nombreux auteurs (par ex. Blatt et al, 1981, p. 50) ont estimé avec Visser 1969 que la fonction de densité des grains d'un dépôt est lognormale. Mais il est difficile d'appliquer ces notions à des échantillons qui ne sont pas des nombres purs, mais des poids. Derrière chaque pesée se cachent des grains de densité, de forme et de rugosité différentes.

2.3. Classes granulométriques

Plusieurs écoles de sédimentologues ont étudié le pourcentage relatif de sable-limon-argile ou de fractions bien déterminées ($<10\ \mu\text{m}$ / $10\text{--}50\ \mu\text{m}$ / $>50\ \mu\text{m}$, etc.), pour en déduire les milieux de transport et de dépôt.

La figure 15 présente quelques résultats tirés de Cailleux et Tricart, 1959, et de Rivière, 1977, et où nous avons reporté nos échantillons.

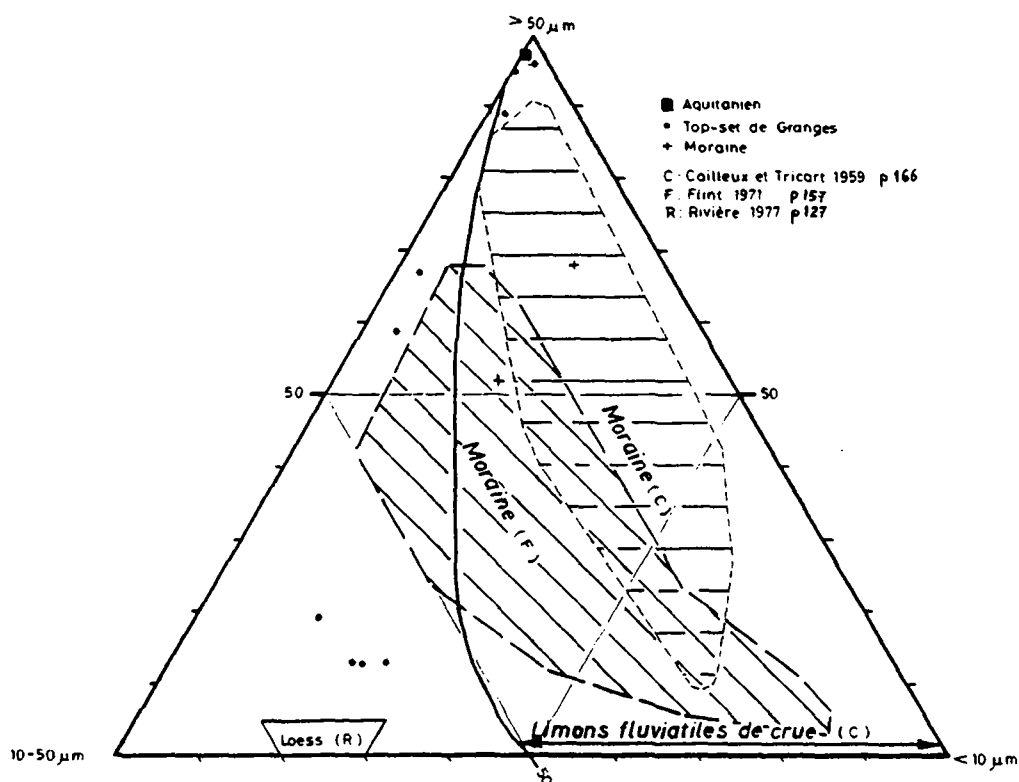


Fig. 15: Diagramme ternaire 10-50 μm avec domaines tirés de la littérature

Cette approche met en évidence le caractère ubiquiste des sables et des limons et souligne le rôle des argiles dans la détermination d'un milieu sédimentaire (tableau 7 p. 26).

Malheureusement les déductions de Cailleux, Tricart et Rivière ne peuvent pas être généralisées, car les pourcentages sont trop fortement influencés par les conditions locales du dépôt (lithologie du bassin versant, climat, etc.).

2.4. Indices granulométriques

Une foule d'indices créés par les statisticiens ont été appliqués aux pourcentages pondéraux des courbes granulométriques. Ces indices correspondent aux notions de moyenne, d'écart-type, de dissymétrie et de degré de pic qui caractérisent une distribution d'un grand nombre d'échantillons ou d'évènements.

Ils se calculent soit par le choix de diamètres particuliers (d_5 , d_{10} , d_{16} , d_{25} , d_{50} , etc.), soit à l'aide des moments du 1er, 2ème, 3ème et 4ème ordre (annexe 2 tableau 24 p. 132).

Les diamètres sont d'ordinaire exprimés en $\phi = -\log_2 \frac{d}{d_0}$, et parfois en millimètres ou en microns.

Folk, 1965, et Rivière, 1977, en ont fait l'inventaire. Notons que Rivière en a créé toute une série, en relation avec son mode de détermination et de représentation des courbes.

On trouvera à l'annexe 2 les résultats numériques des indices granulométriques pour les grès aquitaniens, la moraine de fond et les sédiments deltaïques. Nous avons renoncé à calculer les indices par les moments, car la borne inférieure des courbes granulométriques est très souvent inconnue.

2.4.1 Moyenne

L'utilité de la moyenne s'est montrée surtout dans l'étude de l'abrasion des grains par le transport fluviatile ou glaciaire: on suit son évolution de l'amont vers l'aval, dans un bassin donné. Cet indice a aussi sa valeur pour estimer l'importance du bed load sur le suspended load dans un chenal. Il a un sens non pas pris tout seul, mais dans le contexte d'un bassin versant, à un endroit et à un moment précis.

Application à notre étude

La figure 16 p.36 donne les résultats graphiques des indices. On y remarque la cohérence des différents indices de la moyenne. Il ressort que:

- les limons des top-sets ont un diamètre moyen compris entre 15 et 20 μm ,
- les sables des top-sets entre 60 et 200 μm ,
- les fore-sets entre 350 et 5000 μm ,
- le grès aquitainien env. 270 μm ,
- les moraines entre 30 et 100 μm .

En fait, il n'existe pas de saut entre les sables et les limons deltaïques, car le passage peut se faire graduellement dans les zones de granoclassement.

2.4.2 Ecart-type

Le calcul de l'écart-type permet de quantifier le degré de dispersion, l'étalement ou le "tri" d'une courbe granulométrique. Cet indice est souvent représenté avec la moyenne: on constate ainsi que la classe des sables est la mieux triée (Sly et al, 1983), fait imputable à l'absence de cohésion et à la faible masse des grains (cf. diagramme de Shields).

Application à notre étude

Les sédiments les plus propres se trouvent bien parmi les sables deltaïques ou molassiques. Les limons deltaïques sont beaucoup moins purs et les matériaux à fraction graveleuse tels les fore-sets et surtout les moraines couvrent le plus grand éventail (fig. 16 et 18 p. 37 et 38).

Nous avons aussi tenté une comparaison avec des exemples tirés de la littérature (fig. 17 p. 36 et valeurs numériques à l'annexe 2). Si la figure 17 montre des grandes tendances, les domaines de recouvrement sont très importants, et seuls les échantillons aux valeurs extrêmes peuvent être attribués à un dépôt.

2.4.3. Dissymétrie

Les indices de dissymétrie sont appliqués pour mettre en évidence les extrémités des distributions granulométriques. On fait ressortir par exemple le piégeage des fines par les éléments plus grossiers dans le lit d'une rivière ("armoring", Graf, 1971, p. 101).

Application à notre étude

En dépit du choix restreint de diamètres caractéristiques, on trouve une relative bonne homogénéité des résultats par les différents indices. Tous les échantillons sont marqués d'une prédominance des fines à l'exception du sable 24 (fig. 18b p. 37). La représentation des indices tri-dissymétrie sur un même diagramme (fig. 18c) montre deux domaines distincts:

- un domaine fluviatile à tri important et faible dissymétrie,
- un domaine lacustre à granulométrie étendue et forte dissymétrie.

On semble voir ici le rôle joué par la turbulence sur ces paramètres. Ce processus avait permis à Friedman, 1961, de distinguer les sables de rivière des sables de plage (fig. 18c p. 37).

Notons que de toute manière, ces deux indices reflètent bien le degré d'anisotropie des échantillons, donc la présence de granoclassement.

2.4.4. Degré de pic

La notion de degré de pic sert à quantifier dans quelle mesure une distribution est différente de la fonction Gaussienne ou Normale. Le tableau 24 p. 132 donne la valeur des indices pour la distribution de Gauss. En présence de valeurs plus faibles, la distribution est dite "platéicurtique" (aplatie), dans le cas contraire, "leptocurtique" (pointue).

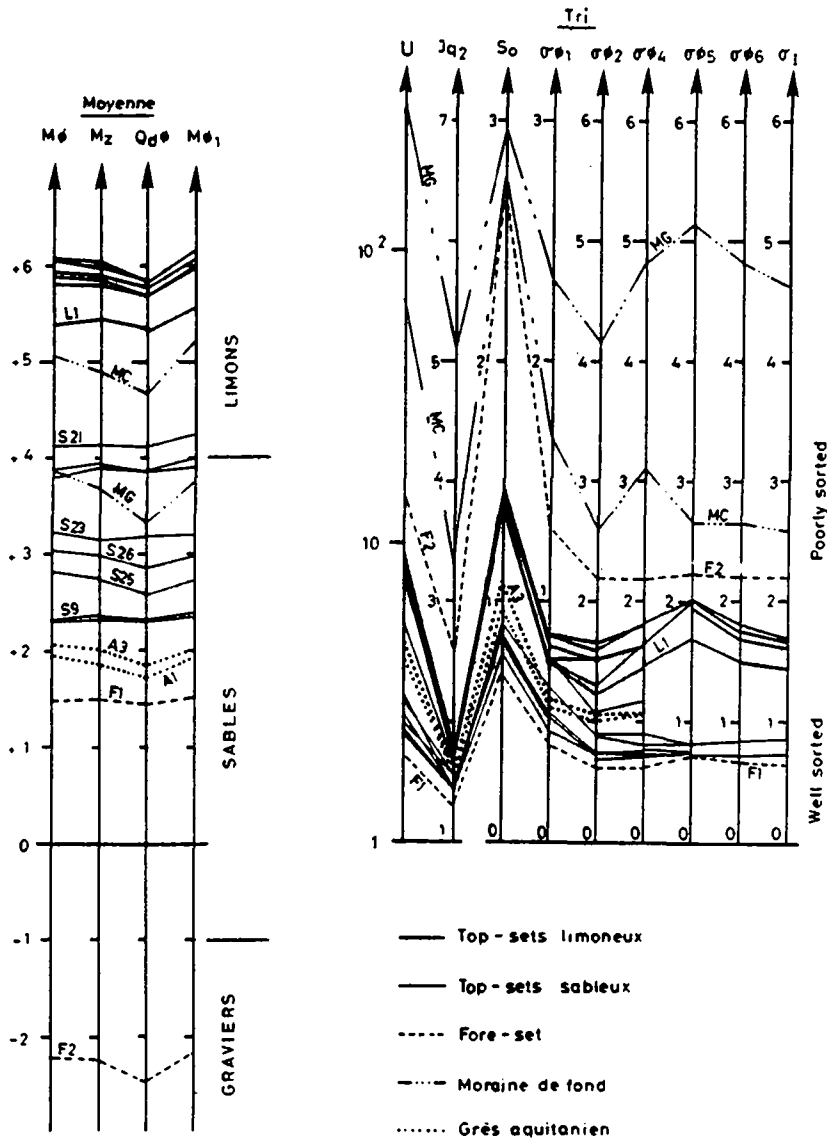


Fig. 16: Représentation graphique des moyennes et tris des échantillons de la Lembe

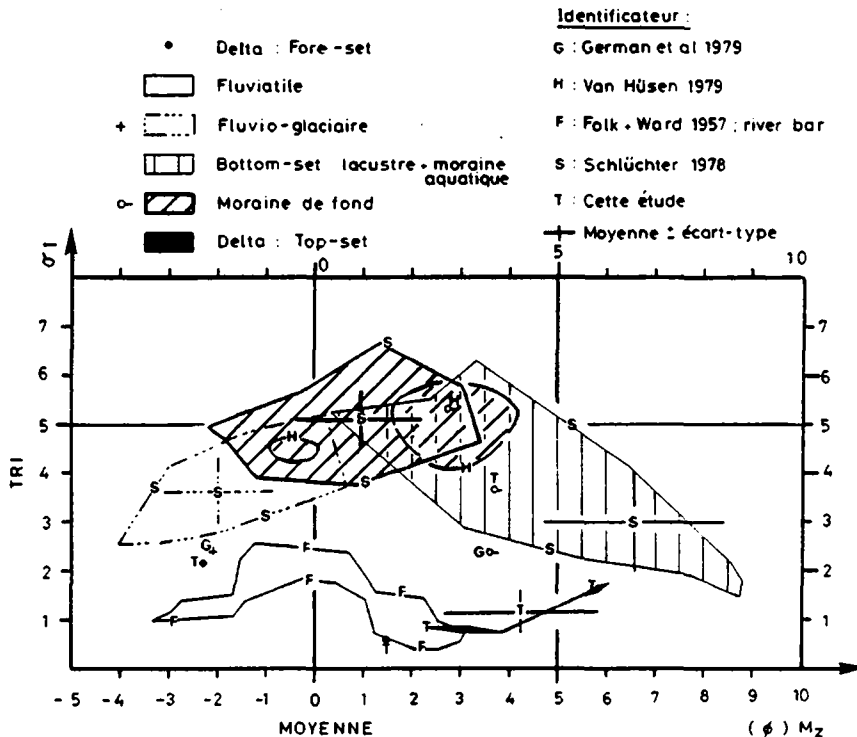


Fig. 17: Classification des dépôts par les indices $M_z - Tri \sigma_I$

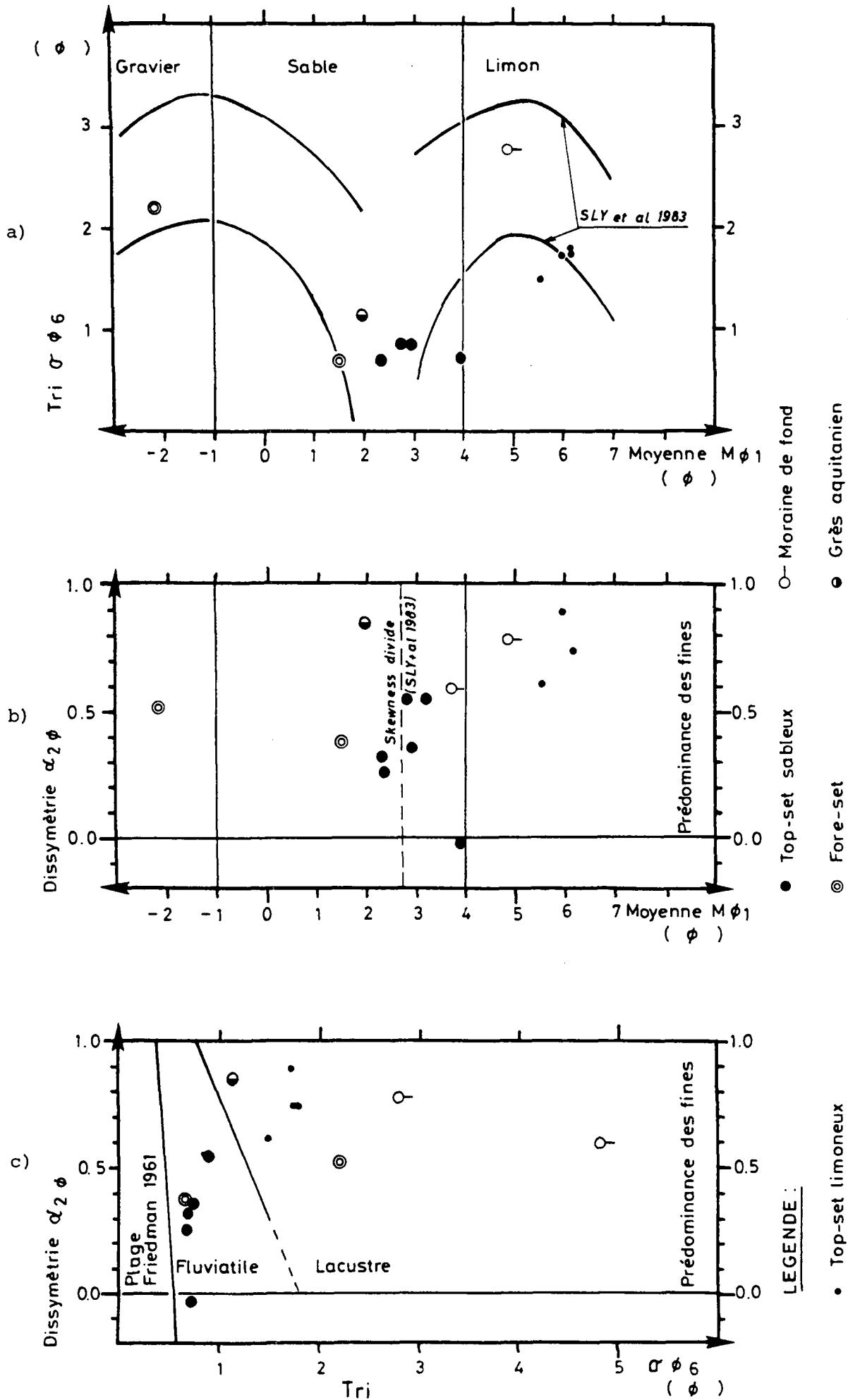


Fig. 18: Relation entre les indices granulométriques des échantillons de la Lembe

Cet indice a montré dans la littérature la plus forte dispersion, il est d'ordinaire appliqué en relation avec d'autres indices.

Application à notre étude

On note une bonne cohérence des résultats dans le cas des sables des top-sets, des fore-sets et de la moraine de Coumin, qui sont distribués normalement, d'après les 3 indices (annexe 2).

En revanche, les valeurs obtenues pour les limons, l'Aquitaniens et la moraine de Granges sont trop dispersées, elles ne permettent pas d'en déduire le degré de pic réel.

2.4.5 Approche Passega

Passega, qui a bien étudié les transports fluviaux du Mississippi, a conclu que les paramètres importants d'une courbe granulométrique sont simplement:

- le centile supérieur d_{99} et
- la médiane d_{50} (fig. 19).

Ces deux indices lui ont permis une identification des modes de transport fluviaux, le bed load, le suspended load (qu'il appelle "graded suspension") et le wash load (nommé "uniform suspension").

Application à notre étude

Les granulométries que nous avons étudiées sont reportées dans la fig. 19. On y découvre une assez bonne homogénéité des résultats avec ceux de Passega, bien que le centile supérieur dépende des aléas de la turbulence pendant le transport et le dépôt, et cette turbulence fut prédominante dans le cas de la vidange rapide du lac périglaciaire de la Lembe.

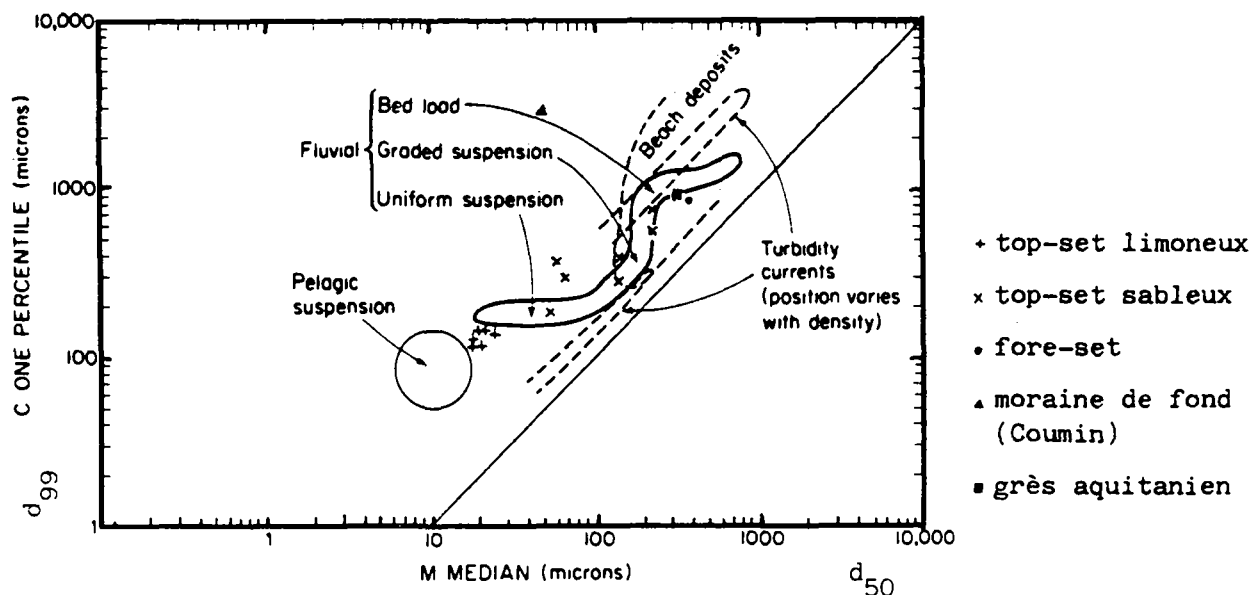


Fig. 19: Classification des dépôts par les indices d_{50} - d_{99} (Passegga, 1964)

2.5. Morphométrie des graviers et des pierres

Cailleux et Tricart, 1959, ont créé les indices d'aplatissement et d'arrondi, et en ont défini les conditions de validité. Schluechter, 1976, en a, par exemple, fait un performant usage. Ces indices permettent d'appréhender l'effet d'émoussage des arêtes et de martelage des faces par le transport en "bed load". D'ordinaire, l'étude statistique est menée sur chaque classe granulométrique et chaque famille pétrographique (cristallins, grès calcaires, etc.).

Application à notre étude

La fig. 20 met bien en évidence le rôle du transport fluvial; il a été capable après un court trajet de quelques kilomètres, de bien arrondir les arêtes des graviers morainiques. Notons néanmoins que le degré d'arrondi de nos fore-sets est nettement moins prononcé que dans les exemples fluviaux de Schluechter, 1976.

On remarque de profondes stries glaciaires sur les calcaires morainiques et deltaïques. En revanche, les roches cristallines de la moraine et du delta présentent souvent une surface grumeleuse et rarement striée. Ces roches, qui possèdent d'excellentes caractéristiques - sans traces d'altération chimique -, doivent certainement leur aspect irrégulier à l'action

abrasive de la matrice morainique sablo-limoneuse lors du transport glaciaire. Cette action fait ressortir les duretés différentes des minéraux composant les granites et les gneiss.

2.6. Morphoscopie et exoscopie des sables de quartz

L'étude de la forme des sables a un passé assez long. Tant aux USA qu'en France, les géologues ont amassé une solide expérience. Par exemple, la classification mise au point par Cailleux et Tricart, 1959, p. 66, a connu une certaine vogue, elle repose sur l'état de surface dit non-usé, émoussé-luisant ou rond-mat.

Le microscope électronique à balayage a redonné de l'élan à l'étude des environnements par l'état de surface des quartz. Krinsley aux USA et Le Ribault, 1979, ont été les principaux artisans de ce renouveau. Ils ont mis en évidence les caractères particuliers d'une série de milieux typiques.

2.6.1 Morphoscopie: application à notre étude

L'examen du quartz a porté sur une centaine de grains au total (taille supérieure à 0,5 mm). Ceux-ci ont été traités à l'acide chlorhydrique.

- Les grès aquitaniens possèdent un caractère généralement émoussé-luisant, ce qui les range dans la catégorie des grains façonnés par le transport fluviatile.
- Les grains de la moraine de Coumin sont soit émoussés-luisants, soit non-usés. Tricart et Cailleux attribuent le caractère non-usé à l'action du gel ou d'un glacier.
- Les sables deltaïques de Granges diffèrent peu des grains morainiques, les émoussés-luisants sont légèrement plus abondants.

Il n'a pas été trouvé de grains ronds-mats, indices d'un transport éolien.

Ainsi, le caractère émoussé-luisant des sables molassiques est sous-jacent dans tous les dépôts quaternaires issus de l'érosion du substratum tertiaire. L'action du glacier s'est mieux marquée que celle du court transport torrentiel par la Lembe.

| Lithologie | Moraine de Coumin | | Fore-set de Granges | |
|-------------------|-------------------|-----|---------------------|-----|
| | Nbre | % | Nbre | % |
| — Calcaires | 24 | 38 | 37 | 60 |
| -- Grès calcaires | 24 | 38 | 8 | 13 |
| Cristallins | 16 | 24 | 17 | 27 |
| Σ | 64 | 100 | 62 | 100 |

20 < L < 110 mm

$$A = \frac{(L+l)}{2E} \cdot 100$$

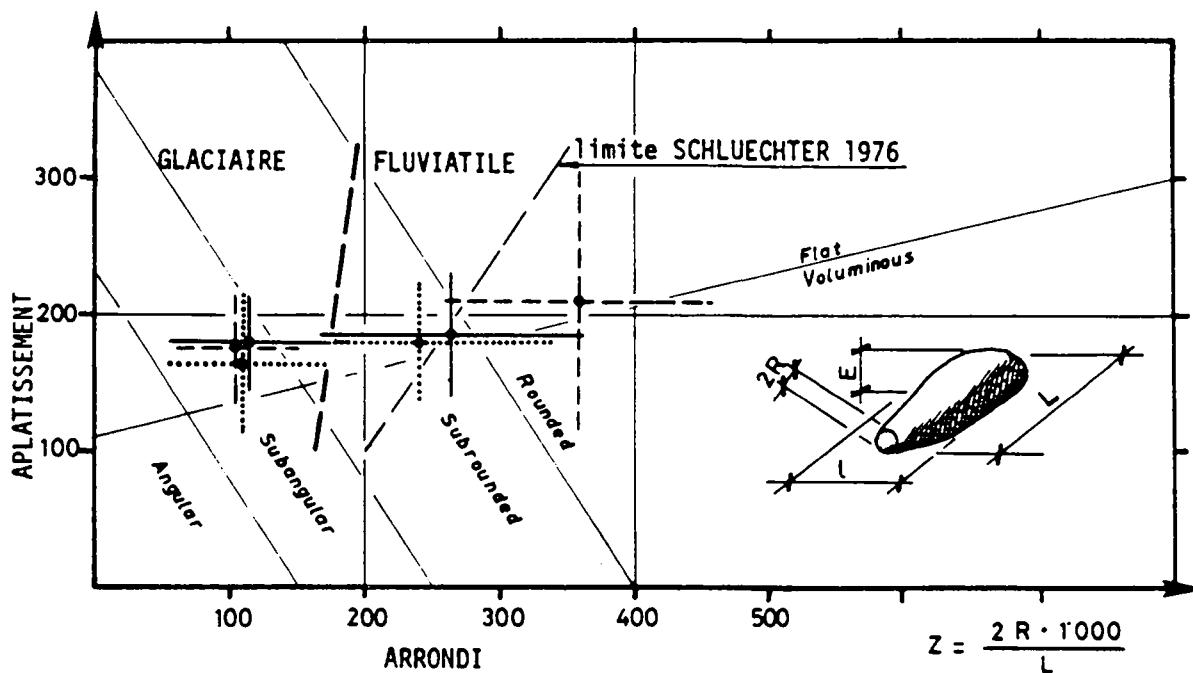


Fig. 20: Morphométrie des galets de la Lembe

2.6.2 Exoscopie: application à notre étude

25 grains de quartz de 300 à 1000 µm provenant de la molasse aquitanienne (6 échantillons), de la moraine (5 échantillons) et du delta (14 échantillons), ont été étudiés au scanner de l'Institut Interdépartemental de Métallurgie. La moitié des grains a été nettoyée à l'acide chlorhydrique (fig. 21 p. 43).

Il ressort que les transports morainiques et fluviatiles ont peu affecté l'état des grains molassiques: les caractères remarquables sur les quartz molassiques, tels le polissage des arêtes, la dissolution de la couche superficielle de silice, les cassures "en escalier" et les traces de chocs en V, s'observent tant sur les quartz morainiques que deltaïques. Il n'a ainsi pas été possible de mettre en évidence une surabondance des caractères spécifiques dans un des dépôts étudiés, car les grains de la molasse ont déjà atteint un degré de maturation élevé, avec une histoire complexe. Le scanner aura permis aussi de se rendre compte de l'effet de la diagenèse sur les quartz du delta: de petits rhomboèdres et scalénoèdres de calcite recouvrent plus ou moins totalement certains grains. Les quartz n'ont pas subi d'altération pédogénétique (absence de dépôts superficiels de silice).

Nulle part, des diatomées n'ont été remarquées.

2.7. Autres méthodes

Mentionnons parmi les méthodes que nous n'avons pas appliquées, la morphométrie des sables, qui revient à quantifier la forme et l'état des angles par une grande diversité d'indices. Blatt et al., 1980, p. 77, en font l'inventaire. La morphométrie des sables est actuellement moins à l'honneur, car elle est entachée d'un facteur subjectif encore plus important que celle des graviers (choix de l'arête, détermination du rayon d'une arête peu émoussée). L'appareillage de Winkelmolen permet une mesure plus objective, qui se corrèle bien avec certains indices, d'après Willetts et Rice, 1983. Notons que Parks, 1983, fait déterminer les caractéristiques morphométriques des grains grâce à la digitalisation de leur contour par l'ordinateur.

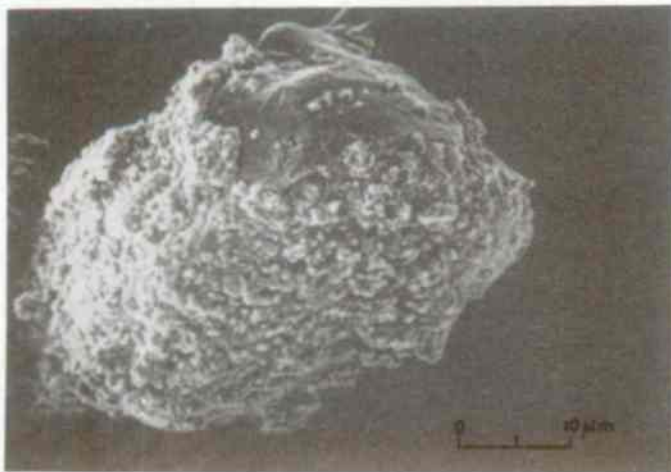
Fig. 21: Exoscopie des quartz de la Lembe



Quartz aquitanien A1 (350 x)

La couche superficielle et les arêtes sont polies. En revanche, les cassures en escalier semblent fraîches.

Delta de Granges



Quartz des top-sets S9 (150 x)

Le grain est emballé par la calcite diagénétique.



Quartz des top-sets S9 (600 x)

Le degré de polissage des arêtes est élevé. Mais les traces de dissolution en chevrons et les empreintes de choc (triangles, croissants, losanges) ne sont pas complètement oblitérées.

2.7.1 Analyses factorielles

Ce traitement des courbes granulométriques découpées en un grand nombre de classes vise à trouver des échantillons "facteurs". Ces échantillons fictifs sont susceptibles de représenter au mieux la composition des différentes courbes granulométriques, grâce à des combinaisons linéaires. (Blanck et Korosec, 1979).

On corrèle d'ordinaire les "facteurs" avec des niveaux énergétiques du transport fluvial et l'on définit, comme Rivière l'a fait pour ses indices \bar{X} et N, des faciès dont les interprétations sédimentologiques sont assez proches. Nous n'avons pas appliqué cette méthode.

2.7.2 Analyses discriminantes

A partir d'un nombre limité de paramètres (par ex. moyenne, tri, dissymétrie et pic pour Reed et al, 1975) déterminés sur un grand nombre d'échantillons d'origine connue, on établit une fonction discriminante entre deux milieux où l'on suppose une loi de distribution normale des paramètres. La fonction peut alors être appliquée à un échantillon d'origine inconnue ou douteuse.

Nous n'en connaissons qu'un exemple, celui de Reed et al, 1975. Malheureusement, les courbes granulométriques ont été établies par la balance de sédimentation. Leurs courbes sont donc différentes de celles résultant du tamisage et de l'aréomètre. Il n'est ainsi pas possible de faire ici une démonstration de cette méthode.

3. Conclusions sur les méthodes complémentaires de laboratoire

3.1. Allure des courbes granulométriques

On a fait dire beaucoup de choses à l'allure des courbes granulométriques. Les résultats ne sont pas toujours convergents. Trop d'embûches se lient pour que la courbe granulométrique soit univoque. On se rend compte qu'une même courbe peut être le fruit d'interactions transport-dépôt bien différentes, surtout si la fraction sableuse - la plus sensible à la turbulence - est importante.

Une approche statistique plus poussée sur un plus grand nombre d'échantillons pris au même endroit élargirait encore le faisceau des interprétations. Rappelons que la détermination de la courbe granulométrique d'un même échantillon est sujette à des variations de l'ordre de plusieurs %, liées à la méthodologie (tamisage, aréomètre). La courbe granulométrique ne devrait servir qu'à la simple description d'un échantillon.

3.2. Classes granulométriques dans les diagrammes ternaires

Cette approche est utile non tant pour l'identification d'un milieu, que pour la représentation d'un grand nombre d'échantillons issus d'un même bassin. On met en évidence la variation des proportions des classes granulométriques qui dépend par exemple de la longueur du transport.

3.3. Indices

Le tour d'horizon sur les indices permet de faire les remarques suivantes:

- Une seule analyse granulométrique par échantillon est insuffisante si l'on veut garantir une grande précision sur le calcul des indices ("eine Messung ist keine Messung").
- Le calcul exact par les moments est possible seulement si les extrémités des distributions sont bien connues. Cette situation se présente rarement avec les techniques de détermination usuelles.
- Pour la comparaison d'indices, il faut que les grains possèdent les mêmes caractéristiques pétrographiques et morphologiques.
- Les indices sont vraiment adaptés à l'étude d'un même (sous-)bassin versant, là où les dépôts ont une parenté pétrographique.
- L'usage d'indices simples établis à l'aide de quelques diamètres caractéristiques, montre une cohérence des valeurs, à l'exception du degré de pic. Il semble que la notion de distribution gaussienne normale soit peu applicable aux courbes granulométriques où un pourcentage pondéral et non un nombre pur figure en ordonnée.

- Une tentative de discrimination des milieux lacustres et fluviatiles a été faite à l'aide des indices du tri et de la dissymétrie. Ce résultat est certainement strictement représentatif des conditions locales de transport et de dépôts qui ont régné lors de la formation du delta de Granges.

3.4. Morphométrie des graviers et des pierres

Les indices d'aplatissement et surtout d'arrondi constituent un moyen simple et efficace de distinguer le dépôt glaciaire du sédiment fluviatile. Bien entendu, cette méthode s'applique à l'intérieur d'un même bassin versant. Un grand nombre de mesures sur chaque classe pétrographique et granulométrique permet de diminuer le côté subjectif de l'indice d'arrondi, qui est très sensible aux variations du rayon minimum. Cette méthode est surtout adaptée à l'étude des roches sédimentaires qui sont en général anisotropes.

3.5. Morphoscopie des quartz

Cette méthode est utile lorsque les transports glaciaire, éolien et fluviatile ont duré suffisamment longtemps avant le dépôt pour que les caractères distinctifs du dernier transport oblitèrent les marques précédentes. Malheureusement, cette condition n'est pas remplie dans notre cas.

3.6. Exoscopie des quartz

Si le développement de cette approche a permis de distinguer une grande série de milieux différents, son application à notre étude n'est pas très évidente, car:

- les quartz tertiaires possèdent déjà un passé complexe,
- les nouveaux transports sont brefs,
- les eaux de ruissellement lors de la formation des dépôts n'avaient pas le même caractère acide qu'actuellement. Elles circulaient sur des sols pauvres en végétation. On peut expliquer ainsi la faible dissolution de la couche superficielle des quartz.

Les résultats de ce chapitre peuvent être présentés succinctement par le tableau 10.

Tableau 10: Méthodes de laboratoire pour l'identification des milieux sédimentaires

| Approches | Auteurs | Méthodologie | Domaines d'application |
|--|---|--|---|
| 1 Allure des courbes granulométriques | DOEGLAS 1946 KITTLEMAN 1964 RIVIERE 1977 VISHER 1969 | G + R G + (O) + R G + (O) + R G + R | Sables fluviaux Sables et graviers propres concassés ("clastiques") Limons et argiles lacustres et marins Sables propres |
| 2 Classes granulométriques | CAILLEUX + TRICART 1959 | G | Sédiments fluviaux au sein d'un même bassin versant |
| 3 Analyses factorielles | BLANCK et al, 1979 | O | Sédiments fluviaux au sein d'un même bassin versant |
| 4 Indices granulométriques | FOLK 1965 | (O) + R | Sédiments fluviaux, éoliens et glaciaires au sein d'un même bassin versant |
| - analyse discriminante | REED et al, 1975 | O | Sédiments fluviaux, éoliens et glaciaires au sein d'un même bassin versant |
| - d_{99-d}^{99-50} | PASSEGA 1964 | G + R | Sédiments fluviaux, lacustres et marins aux caractères bien marqués |
| 5 Morphométrie des sables | BLATT et al 1980 | binoculaire | Sédiments fluviaux, coefficients de traînée |
| - indices de sphéricité, etc. | WINKELMOLEN 1971 | S | Sédiments fluviaux, coefficients de traînée |
| - rollability | PARKS 1983 | O | Sédiments fluviaux, éoliens et marins bien typés |
| - analyse discriminante | CAILLEUX + TRICART 1959 | G + R | Sédiments fluviaux et glaciaires au sein d'un même bassin versant |
| 7 Morphométrie des des graviers et pierres | CAILLEUX + TRICART 1959 | binoculaire/R | Sédiments fluviaux, éoliens et glaciaires aux caractères bien marqués |
| 8 Morphoscopie des sables de quartz | LE RIBAUT 1979 | scanner/R | Tout sédiment aux caractères bien marqués |
| 9 Exoscopie des quartz | | | |

Légende: G = report graphique

O = traitement (facultatif) par ordinateur

R = comparaison des résultats avec échantillons de référence

S = utilisation d'un appareillage standardisé

IV. DEFORMATIONS DES TOP-SETS DE GRANGES

1. Généralités

Un à trois niveaux de sable et de limon sont affectés par d'importantes déformations dans les top-sets de Granges (fig. 22 p. 52, voir aussi coupes fig. 5, 6 et 7 p. 13, 14 et 15).

Avant d'entrer dans le détail, essayons de dégager les caractéristiques générales des déformations. Un dossier photographique se trouve à l'annexe 5 p. 149.

De prime abord, le spectateur est frappé par l'aspect chaotique et désorganisé des structures. Un dynamisme y transparait, surtout là où le contact entre les sables et les limons a disparu (fig. 67 p. 151 à l'annexe 5). Les sables semblent localement s'être comportés comme des fluides, ce sont alors les limons qui servent de marqueurs: ils permettent de suivre les formes tortueuses et de faire le lien entre les poches de sable. En dépit de l'apparence désordonnée des déformations, celles-ci possèdent dans leur ensemble une vergence à peu près verticale (fig. 23 p. 53). Les couches de limon n'ont pas toujours conservé leur épaisseur initiale: des migrations horizontales se constatent: les fines vont alors s'accumuler dans les diapirs (fig. 70 p. 152 à l'annexe 5).

Les sables sont parfois tronqués par des niveaux d'érosion.

Notons encore que le caractère fluide des déformations peut être absent: les couches sableuses, épaisses de 20 cm et plus, sont quasiment dans leur état initial à quelques flexions ou failles près.

Les déformations ont touché la totalité du front de taille de la gravière (fig. 4 p. 8).

Afin de donner un nom reconnu par la littérature à ces structures, nous avons cherché à reconnaître les critères de classification des déformations. Nous présentons ci-dessous 4 exemples. Force est de constater qu'il est difficile de trouver une classification purement descriptive bien adaptée à notre cas.

1) Classification selon Allen, 1977, p. 20

Critère: relation entre les couches

- 1) internal: n'affectant pas le mur et le toit de la couche (ex.: cross-bedding déformés, convolutions)
- 2) interpenetrative: affectant le mur et/ou le toit de la couche par des intrusions (ex.: ball-and-pillow, dish, pocket)
- 3) multilayer: affectant plusieurs couches (déformations parallèles, souvent d'origine tectonique)
- 4) multilayer-interpenetrative: affectant plusieurs couches par des intrusions

2) Classification selon Branchley et Newall, 1977, p. 820

Critère: mode de formation et géométrie des déformations

- 1) load casted bed (= pocket)
- 2) ball-and-pillow structure
- 3) sand roll (=dish)
- 4) asymmetric load cast (= pocket)
- 5) multilayer fold
- 6) slump
- 7) recumbently folded cross-stratification
- 8) convolute bedding

3) Classification selon McKee, Reynolds et Baker, 1962, p. 152

Critère: géométrie des déformations

- 1) irregular contorted bed: twisted, drawn out, compressed bed
- 2) intraformational recumbent fold: regularly inclined folds
- 3) convolute bedding: regular nearly vertical folds
- 4) intraformational thrust structures: repeated miniature thrust faults and related overturned fold structures within a stratification unit

4) Classification selon Selley, Shearman, Sutton et Watson, 1963, p. 228

- 1) distortion of lamination (diapir, dish, etc.)
- 2) disruption of lamination (irregular contortions, diapir, etc.)
- 2) dissolution and reconstitution of lamination (diapir, pocket, pillar, etc.)
- 4) streamer (= diapir)
- 5) cusp or point-up structure (= dish)
- 6) pseudonodule (= ball-and-pillow)

Compte tenu de ces exemples et des usages actuellement en vigueur, nous retiendrons les termes du tableau 11 p. 52 définissant des types de déformations bien distincts.

Cette classification ne possède aucune connotation génétique. Elle décrit la forme des déformations, quelles que soient leur taille ou la granulométrie des sédiments impliqués. Les slumps ne sont pas traités dans ce cadre. Nous n'avons pas cherché à trouver des traductions françaises aux expressions anglaises, consacrées par la littérature et les usages. Une liste des synonymes pour chaque type a été reportée dans l'annexe 4. Quelle profusion et quelle disparité!

Nous pouvons retourner à nos top-sets pour donner un nom à leurs déformations.

2. Examen détaillé des top-sets

Parmi les types identifiés dans le tableau 11 p. 52, nous reconnaissons à Granges:

- des balls-and-pillows
- des diapirs
- des irregular contortions
- des pillars et
- des pockets.

2.1. Les balls-and-pillows

Les top-sets de Granges nous montrent de nombreux balls-and-pillows sableux, parfois sablo-graveleux aux structures d'enroulement bien marquées (fig. 24 p. 54 et fig. 68, 71 à l'annexe 5, p. 151, 152). Leur taille est comprise entre 2 et 50 cm (fig. 25 p. 54). Ils sont toujours enveloppés par des sédiments plus fins (diapirs) qui les recouvrent parfois complètement. Par rapport à un axe vertical, les balls-and-pillows sont rarement symétriques.

2.2. Les diapirs

Les diapirs sableux ou limoneux centimétriques à décimétriques sont aussi bien représentés (fig. 25). Souvent ils encadrent les balls-and-pillows. On peut observer que les limons ont migré horizontalement à la base du diapir pour s'accumuler dans le diapir lui-même. Au point le plus haut du diapir, le limon s'est parfois écroulé pour recouvrir les strates sableuses.

C'est dans les diapirs de sable que l'on constate la plus forte perturbation des couches initiales (fig. 69 p. 151 à l'annexe 5).

2.3. Les irregular contortions

Ces déformations sableuses ou sablo-limoneuses sont souvent associées aux balls-and-pillows (fig. 24 p. 54). Leur taille va du centimètre au décimètre (fig. 72 à 75, p. 152 à 154 à l'annexe 5).

2.4. Les pillars

On retrouve ces intrusions assez souvent: soit des limons pénétrant des balls-and-pillows sableux, soit des sables limoneux chapeautés par des volcanoes (fig. 76 à 78, p. 154 et 155 à l'annexe 5).

Tableau 11: Types de déformations pénécontemporaines










| Nom | Définition (vue en coupe) | Schéma (sans échelle) |
|-----------------------------|--|---|
| a) pocket | déformation en forme de poche |  |
| b) ball-and pillow | déformation en forme de boule ou de pillow (-lava) renversé |  |
| c) dish | déformation en forme de coupe |  |
| d) diapir | déformation en forme d'anticlinal |  |
| e) flame structure | déformations en forme de flamme |  |
| f) convolutions | déformations composées d'une succession de plis d'axe vertical ou couché |  |
| g) irregular contortions | déformation à la géométrie quelconque, non réglée |  |
| h) pillar | intrusion en forme de colonne (ou de dyke) |  |
| i) faille (syssédimentaire) | cassure avec rejet |  |



Fig. 22: Déformations des top-sets sous le chenal graveleux à Granges
(photo A. Parriaux)

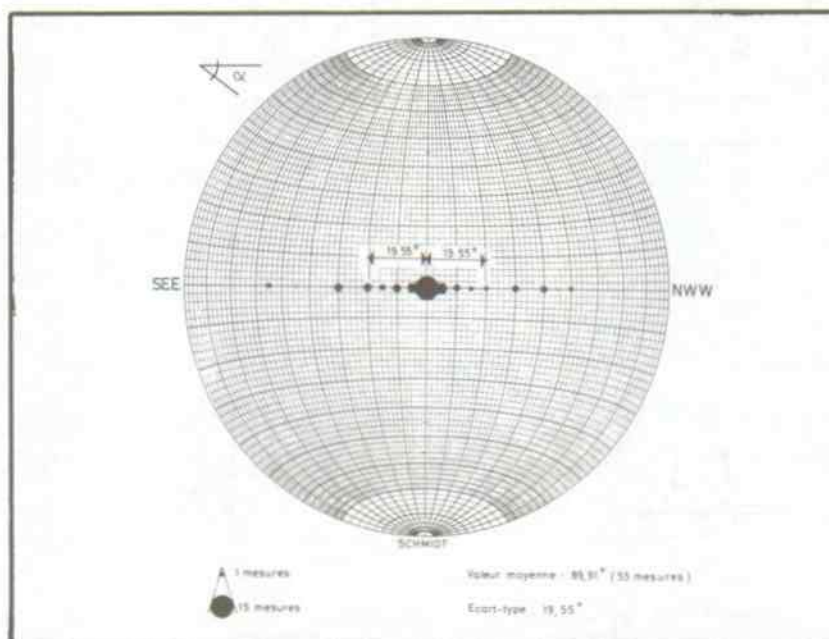


Fig. 23: Vergence des déformations des top-sets de Granges



Fig. 24: Top-set de Granges: ball-and-pillow, diapir et irregular contortions (photo A. Parriaux)

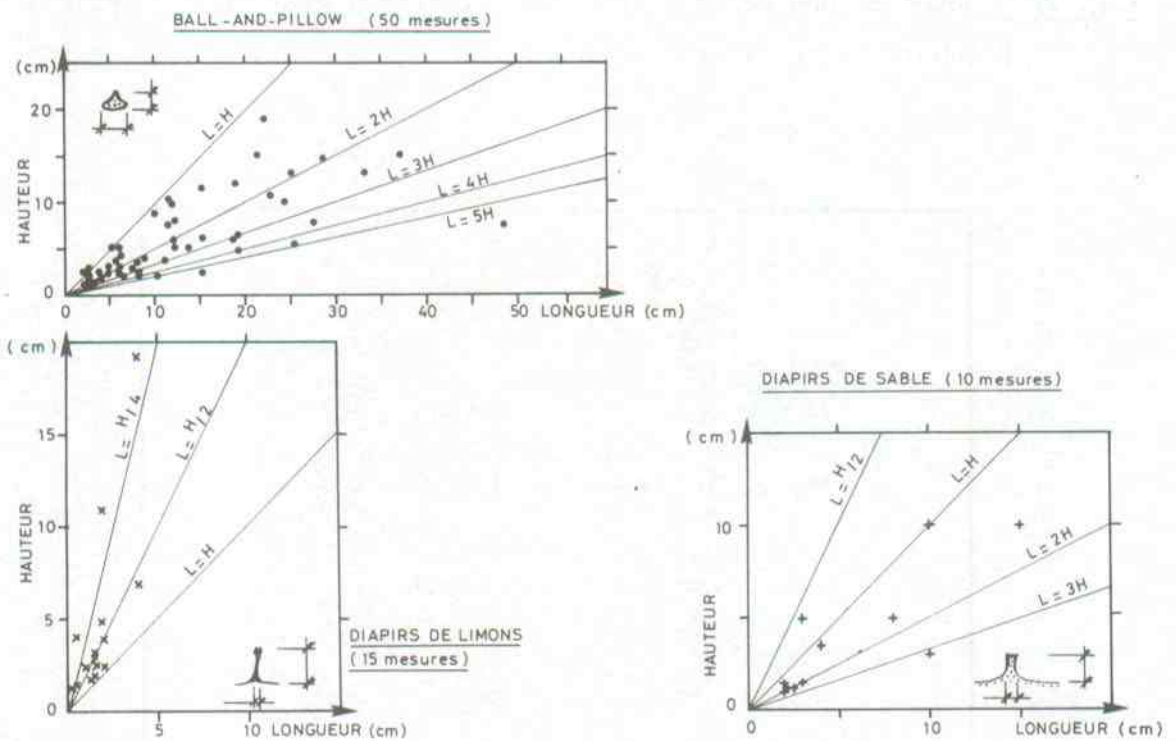


Fig. 25: Top-set de Granges: dimensions des déformations

2.5. Les pockets

Ce type de déformation n'est pas très fréquent: on a affaire essentiellement à des poches de limon ou de sable de quelques centimètres de large dans des sables ou des limons (fig. 78 p. 155 annexe 5).

2.6. Relation stratigraphique

L'observation détaillée des coupes permet de dégager quelques constances dans les cycles de déformations.

- On trouve partout un niveau de base limoneux peu épais (5 à 10 cm). Cette couche n'a subi que peu de déformations (migration horizontale donnant de petits diapirs). C'est le niveau de décollement.
- Des limons sableux plus épais (10 à 50 cm) surmontent le niveau de base. Cette couche s'est comportée comme un fluide: des irregular contortions et des diapirs ont détruit complètement la stratification initiale. Ils emballent les balls-and-pillows sableux.
- Les strates de sable (20 à 50 cm) recouvrent les limons sableux. Quelques laminations de limon peuvent subdiviser l'épaisseur totale en plusieurs membres sableux. Cette couche s'est légèrement fléchie lorsque le sable est épais. Mais si les laminations limoneuses sont abondantes, les strates sableuses sont déformées en balls-and-pillows ou même complètement déchiquetées par des irregular contortions.
- Une séquence déformée se termine par des limons sableux à fines laminations (10 à 50 cm). Cette couche sommitale est transpercée de quelques diapirs qui ont bousculé la stratification et qui ont dû former à la surface des volcanoes.
- Au-dessus, un niveau de rides sablo-limoneuses ou sableuses non déformées a érodé la couche limono-sableuse. Il scelle le cycle déformé.

3. Caractéristiques géotechniques des top-sets

Une série d'échantillons a été prélevée pour déterminer les caractéristiques des sédiments déformés et exondés depuis quelques milliers d'années (fig. 26 et tableau 12 p. 58). Rappelons que l'effet de la diagenèse se limite à un léger encroûtement de calcite sur certains grains (cf exoscopie des quartz fig. 21 p. 43).

On constate d'abord que le poids volumique des particules solides du sable est légèrement inférieur à celui du limon, car les sédiments grossiers possèdent plus de quartz ($\gamma_s \text{ quartz} = 26,0 \text{ kNm}^{-3}$).

Les mesures sur le poids volumique apparent sec γ_d in situ montrent que le limon est actuellement plus dense que le sable. Le degré d'imbrication des limons est plus élevé pour une contrainte verticale actuelle de l'ordre de $\gamma \cdot h = 22 \cdot 4,5 = 98 \text{ kNm}^{-2}$.

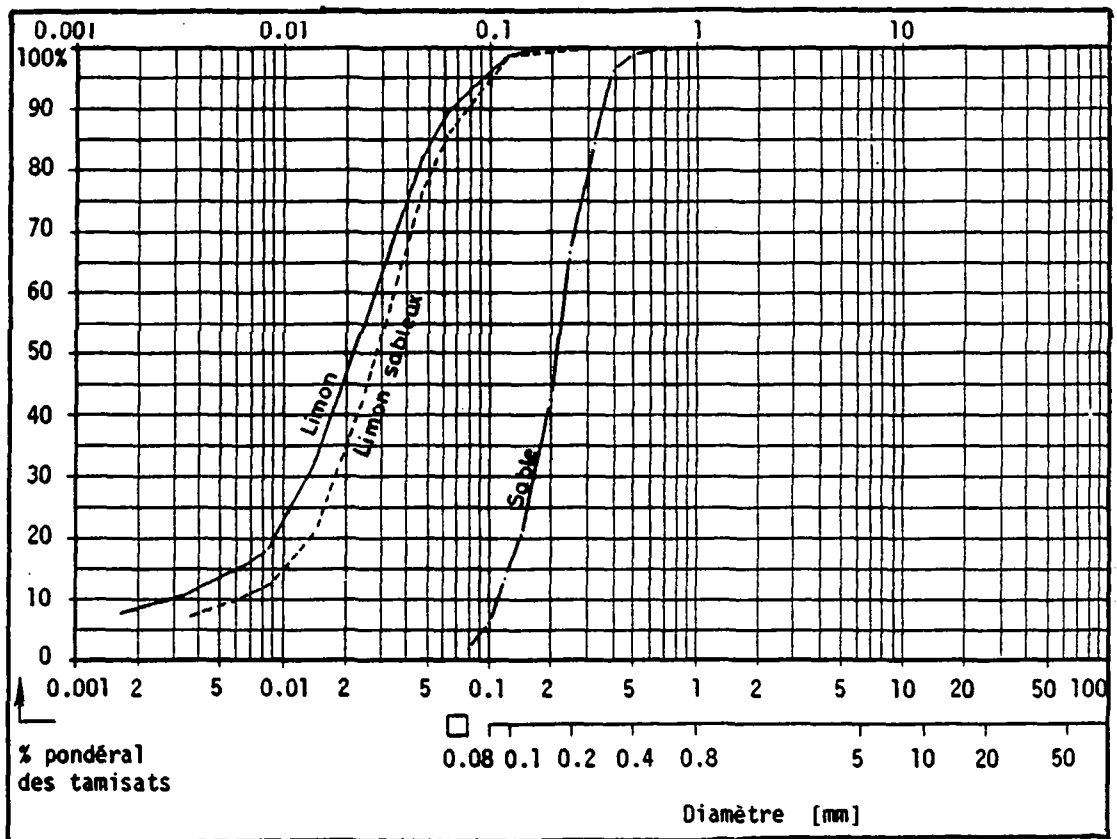


Fig. 26: Courbes granulométriques des échantillons standards de Granges

Nous avons sédimenté nos sols standards dans des colonnes de verre remplies d'eau. Ces essais nous ont déterminé l'indice de vide maximum. Le tassement engendre spontanément des pillars millimétriques dans les limons dès que l'épaisseur finale du dépôt dépasse 8 cm.

Grâce à cette sédimentation et au perméamètre à charge variable, on a établi la relation entre la perméabilité et l'indice de vide (fig. 27 p. 59, détail des mesures et calcul à l'annexe 6.3 p. 164).

Ces sols ont aussi été testés à l'oedomètre (résultats à l'annexe 6.5 p. 168). Le tassement primaire s'effectue en quelques secondes: les surpressions interstitielles disparaissent très vite même dans les limons. Comme il se doit, nos sols fins accusent une plus grande déformabilité, tant dans les petites contraintes que dans les fortes surcharges. Les essais ont montré que le réarrangement des grains à la fin de la consolidation primaire entraîne un tassement secondaire non négligeable. Nous voyons là l'effet du mode de constitution des échantillons. Les sols ont été sédimentés dans les bagues de mesure: les grains ne trouvent pas tout de suite leur position la plus stable. Ce phénomène doit se retrouver dans la nature lors de la sédimentation du suspended load.

La cellule triaxiale ne permet pas de tester nos sols dans la gamme de contraintes et d'indices de vide qui règnent lors de la formation d'un dépôt. Une épaisseur de 50 cm de sable induit une contrainte effective de l'ordre de $\sigma' = \gamma' \cdot h = 8,5 \cdot 0,5 = 4,3 \text{ kNm}^{-2}$. Par les tests triaxiaux usuels, on constate que le limon se comporte comme le sable avec des angles de frottement internes effectifs supérieurs à 30° et une cohésion nulle (annexe 6.6 p. 177). La résistance au cisaillement du limon plus lâche est, bien sûr, beaucoup plus faible.

Tableau 12: Caractéristiques géotechniques des top-sets de Granges

| Sol (classification USCS) | sable standard (SP) | | | limon sableux standard (CL) | | | limon standard (CL) | | |
|---|--|----------------------------|-----------|-----------------------------|-----------------|-------------|----------------------------|-----------------|-----------|
| | nombre analyses | valeur moyenne | V (%) | nombre analyses | valeur moyenne | V (%) | nombre analyses | valeur moyenne | V (%) |
| Poids volumique des particules solides: γ_s (kNm^{-3}) | 5 | 26,213 | 0,26 | 2 | 26,474 | (0,13) | 4 | 26,386 | 0,20 |
| Poids volumique apparent sec/saturé: $\gamma_d/\gamma_{\text{sat}}$ (kNm^{-3}) | 12 | 15,50/ 19,51 | 3,44 - | 3 | 15,89/ 19,80 | (7,24) - | 7 | 15,98/ 19,84 | 6,82 - |
| Indice de vide | | 0,691 | - | | 0,666 | - | | 0,650 | - |
| Poids volumique apparent sec/saturé minimum (kNm^{-3}) | 17 | f (épaisseur de la couche) | | 0 | - | - | 20 | 10,99/ 16,70 | 3,18 |
| Indice de vide minimum | | fig. 27 p. 59 | | | - | | | 1,40 | |
| Limite de liquidité: WL (%) | 0 | - | - | 1 | 22,7 | - | 1 | 22,0 | - |
| Indice de plasticité: Ip (%) | 0 | - | - | 1 | 7,7 | - | 1 | 9,5 | - |
| Compressibilité à l'oedomètre | tassement primaire effectué en quelques secondes | | | | | | | | |
| Résistance au cisaillement (cellule triaxiale) | $\phi' > 30^\circ$, c = 0 | | | - | | | $\phi' > 30^\circ$, c = 0 | | |

V : coefficient de variation = écart-type / moyenne

Sable standard:

indice de vide minimum: 0,564

indice de vide maximum: 0,896

Selon procédure ASTM-D 2049

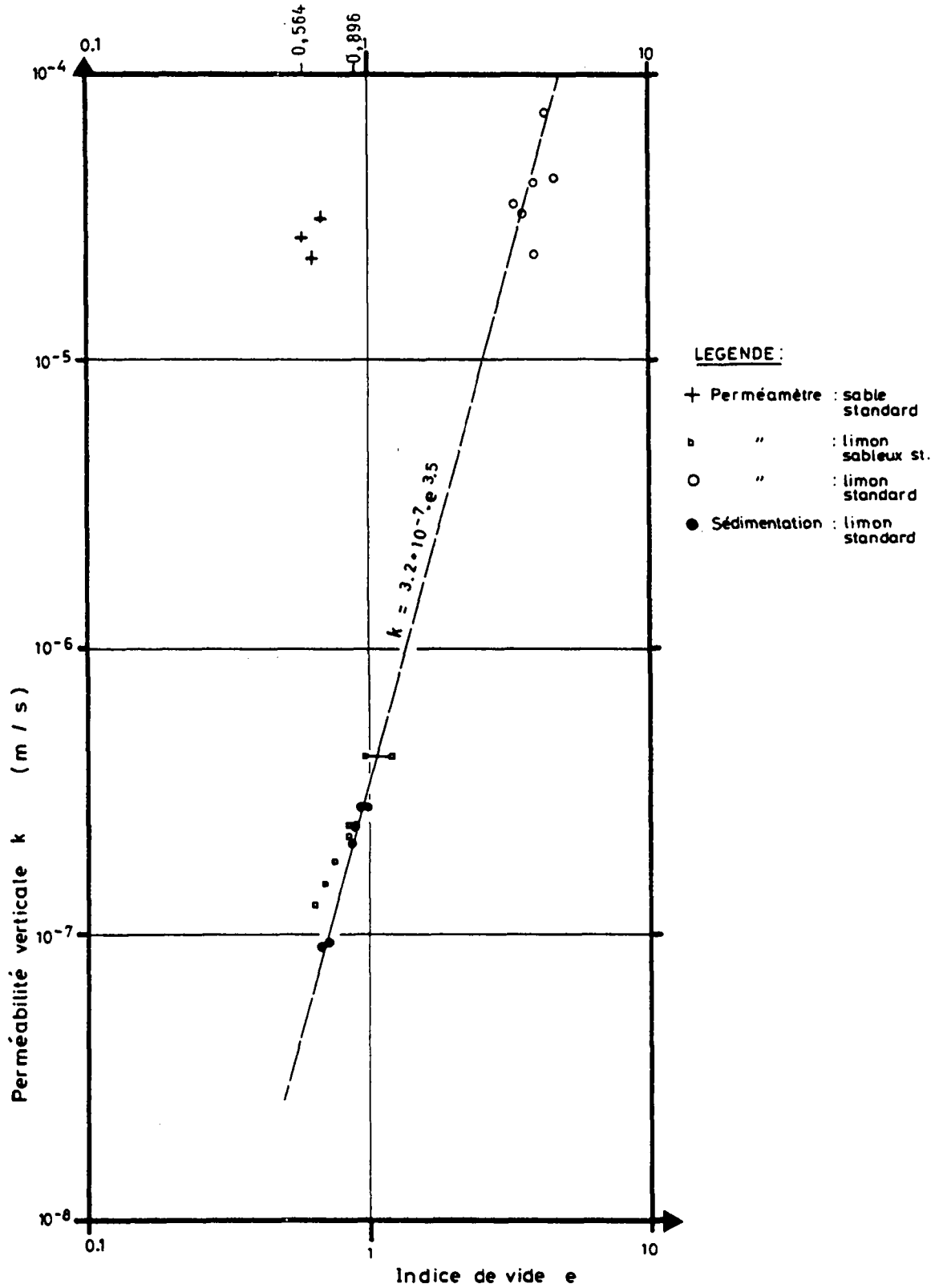


Fig. 27: Relation entre la perméabilité verticale et l'indice de vide des sols de Granges

4. Etude des mécanismes de déformations

4.1. Tour d'horizon bibliographique des déformations observées in situ

Par une étude bibliographique assez large, nous avons cherché s'il existe une relation biunivoque entre un type donné de déformation et un cas de charge. L'annexe 8 présente un inventaire de ces déformations observées dans la nature. Il couvre aussi l'éventail des mécanismes responsables de déformations.

Une large place est dévolue aux structures liées aux turbidites (convolutions, ball-and-pillow, pocket) car ce sont précisément ces dépôts qui ont fait l'objet des études sédimentologiques les plus approfondies. Certains auteurs sont cités surtout pour l'originalité du mécanisme proposé ou leur influence dans la littérature sédimentologique (par ex. Allen 1977, Artyushkov 1963).

4.2. Tour d'horizon bibliographique des expérimentations en laboratoire

L'étude des déformations après rupture ne fait généralement pas partie des préoccupations classiques du géotechnicien, qui est confronté plutôt au comportement à l'état de service d'un sol de fondation (terrassement, sécurité à la rupture, probabilité de ruine, etc.). C'est pourquoi c'est surtout le sédimentologue qui a cherché à recréer en laboratoire les déformations observées lors de ses levés de terrain.

L'annexe 9 présente un état des recherches dans ce sens. Ici aussi nous avons distingué les essais sur un seul matériau et sur plusieurs à la fois.

a) Matériaux

En général, les matériaux utilisés sont créés artificiellement pour l'expérimentation. Ils n'ont pas toujours les caractéristiques des dépôts naturels dont ils s'inspirent.

ex.: plâtre, ciment (Dzulynski + Radomski 1966)

roches broyées (McKee et al 1962)

poix et cire (Deeley 1916)

b) Facteur temps

Comme on ne mime pas des déformations tectoniques, le facteur temps a un rôle mineur. Les déformations se déroulent en moyenne dans un laps de temps de l'ordre de la minute, ce qui est conforme à certains cas de charge dans la nature.

c) Echelle

Les épaisseurs des couches, leurs empilements forment des ensembles qui n'atteignent pas les dimensions des dépôts naturels. L'échelle y est réduite d'un facteur variant environ entre 1:5 (Stewart 1956) et 1:10, voire 1:100 (Weaver + Jeffcoat 1978).

d) Procédure de l'expérimentation

Le plus souvent, les matériaux sont déposés par sédimentation verticale, leur comportement mécanique peut être différent d'un dépôt créé par le courant (bed load). L'accent a surtout été porté sur les cas de charges dynamiques (chocs, vibrations). Mais le type de sollicitations choisi n'est toujours pas comparable avec le phénomène naturel que l'on veut imiter. Par exemple, les vibrations horizontales créées par un moteur (Oulianoff 1962) ne constituent peut-être pas la réplique la plus fidèle d'un tremblement de terre, car les amplitudes du moteur semblent être très fortes et le temps d'application long.

De façon générale, l'analyse quantitative du cas de charge en laboratoire n'est jamais entreprise: nous ne disposons d'aucunes données sur les contraintes en jeu avant et pendant les déformations.

D'autre part, l'évolution des déformations est rarement décrite (aucunes valeurs de l'indice de vide par exemple).

e) Géométrie des déformations

Les résultats obtenus sont assez surprenants. On constate une assez bonne analogie entre les observations de terrain et les essais de laboratoire, mise à part l'échelle réduite. Des déformations inédites, c'est-à-dire qui n'ont pas leur équivalent dans la nature, ont quand même été atteintes en laboratoire, tels les "rouleaux" produits par surcharge trop rapide chez Anketell et Dzulyński 1968.

f) Conclusions

L'approche des géologues a été essentiellement morphologique: on obtient des résultats qui peuvent ressembler aux phénomènes naturels, mais le processus n'est pas étudié pour lui-même. On ne pratique pas de mesures sur les conditions de l'essai. Il faut d'ailleurs admettre que la prise de mesures dans une cuve d'expérimentation nécessite des appareillages assez sophistiqués, car il s'agit de tenir compte de plusieurs paramètres qui évoluent dans le temps simultanément (par ex. la surcharge, l'indice de vide et la pression interstitielle).

Sur la base de ces études bibliographiques, nous avons établi une liste de mécanismes reliés aux déformations-type (tabl.13 p.63). Cette liste est épurée: elle ne contient plus que les mécanismes les plus vraisemblables, conformément aux commentaires des figures de l'annexe 8.

Ces déformations sont reliées à leur milieu sédimentaire au tableau 14 p.64.

4.3. Présentation des mécanismes

Chaque mécanisme va être revu en détail: nous tenterons de dégager les forces en présence dans chaque cas, les conditions de leur application et le type de rupture.

Tableau 13: Liste des mécanismes et des déformations

| | tassement | convolutions | irregular contortions | pocket | ball-and-pillow | dish | pillar | diapir | faille, chevauchement | principale classe granulométrique affectée |
|---|-----------|--------------|-----------------------|--------|-----------------|------|--------|--------|-----------------------|--|
| 1 turbulence | | | | scour | | | | | | sable |
| 2 rupture sous charge ponctuelle | ■ | | | ■ | ■ | | | | | argile, limon |
| 3 cryoturbation | ● | | | | | | | ■ | ■ | limon |
| 4 dégazage | | | ● | | | ● | | | | argile, limon |
| 5 bioturbation | | | ● | | | | ● | | | sable |
| 6 rupture par cisaillement induisant un glissement de terrain | | ■ | ■ | | | ● | ■ | ■ | ■ | argile, limon |
| 7 gonflement des argiles | | | | | | | | ■ | ■ | argile |
| 8 fluage | | | | | | | | ● | ● | argile, NaCl, etc. |
| 9 liquéfaction par surcharge appliquée rapidement | ■ | | | ■ | ■ | ● | ■ | ■ | ■ | sable fin, limon |
| 10 liquéfaction sous chocs sismiques | ■ | | | ■ | ■ | ● | ■ | ■ | ■ | sable, limon |
| 11 liquéfaction sous l'effet de la houle | ● | | | | ● | ● | ● | ● | ● | sable, limon |
| 12 liquéfaction sous l'effet d'une crue | ■ | | | | ■ | ● | ■ | ■ | ■ | sable, limon |

Légende:

- : déformations de plus de 0,3 m
- : déformations de toutes tailles
- : déformations de moins de 0,3 m

| | tassement | convolu- tions | flame structures | irregular contortions | pocket | ball-and- pillow | dish | pillar | diapir | faille | glissement |
|----------------------------------|-----------|-------------------|---------------------|--------------------------|--------|---------------------|------|--------|--------|--------|------------|
| Env. glaciaire | | | | . | | | | | | . | . |
| Env. fluviatile | . | | | | . | . | . | . | . | | |
| Lac | . | . | . | | | | . | . | . | . | . |
| Estuaire | . | | | | | | . | . | . | | |
| Delta | . | | | . | . | . | . | . | . | . | . |
| Plage | | | | | | . | . | . | . | | |
| Mer peu profonde (tempête) | . | | | . | . | . | . | . | . | | . |
| Mer très profonde (turbidite) | | . | | . | . | . | . | . | . | . | . |
| Marécage | | | | | | | . | . | . | | |

Env. = environnement

Tableau 14: Environnements sédimentologiques et déformations

1. TURBULENCE

1.1. Matériau : Tout sédiment.

1.2. Milieu : Chenal de rivière, de delta, de bord de plateforme continentale, etc.

1.3. Etat déformé : Erosion du lit comprenant:

- obstacle scour mark: affouillement autour d'un obstacle (blocs , piles de pont, etc.)
- flute mark : affouillement longitudinal
- transverse scour: affouillement transversal
- cut and fill: creusement d'un chenal et son remplissage.

1.4. Description:

L'affouillement dénote un excès de turbulence de l'eau. Par cisaillement et par succion, les particules sont arrachées au lit et entraînées (ZIPPE et GRAF 1983). Dans la sous-couche laminaire, le transport a lieu surtout par glissement et roulement ("bed load"), tandis qu'au-dessus, les sédiments forment une suspension ("suspended load"). (fig. 28).

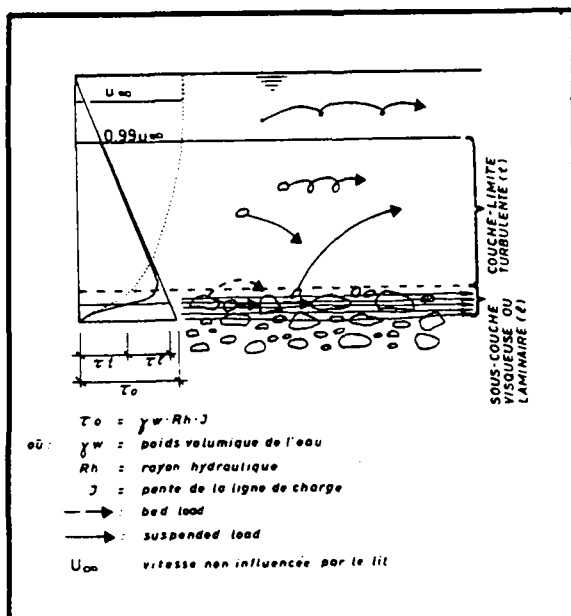


Fig. 28: Modes de transport fluvial.

Une carapace de protection est laissée par la dernière crue ("armoring"). A l'étiage, ce dépôt empêche l'érosion du lit. Lors d'une nouvelle crue, l'augmentation de la vitesse d'écoulement va permettre l'érosion de cette couche. Le lit peut alors subir un intense affouillement (fig. 24 p. 54).

On constate que seule la partie sommitale du lit se liquéfie juste avant son érosion: les grains perdent leurs contacts entre eux. La liquéfaction complète du lit n'est possible qu'en milieu confiné, c'est-à-dire à l'intérieur d'une conduite transportant des particules solides (GRAF 1971 p. 411-459).

En présence de sols fins, l'érosion est généralement discontinue: des "pebble mudstones" sont arrachés au lit, qui se comportent alors comme des graviers ou des pierres.

En conclusion, la turbulence ne peut pas provoquer un profond remaniement d'un dépôt, car son action cisailante s'exerce sur la couche superficielle du lit.

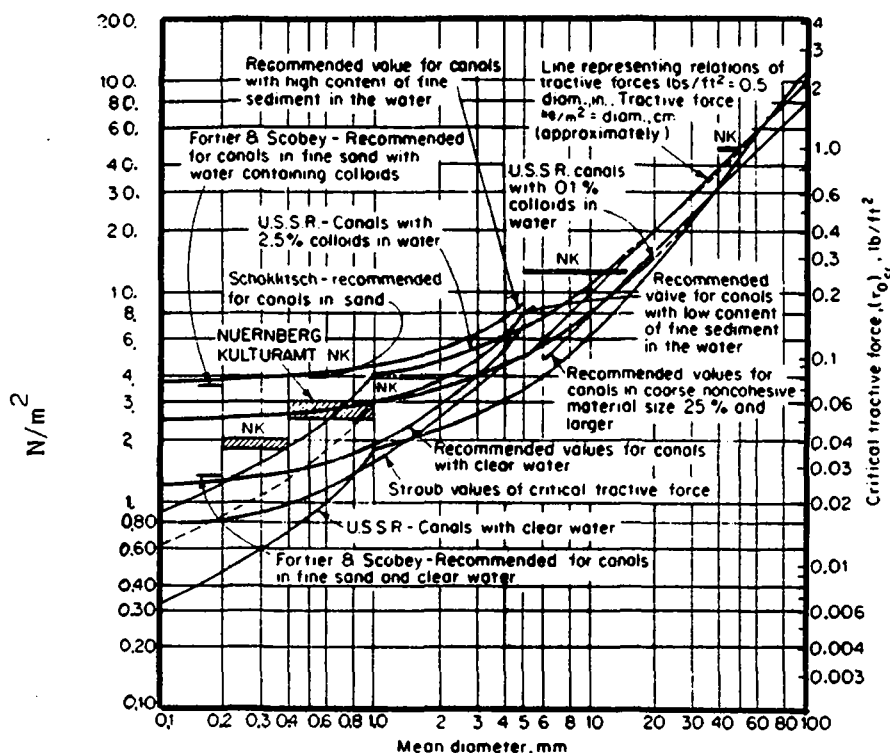
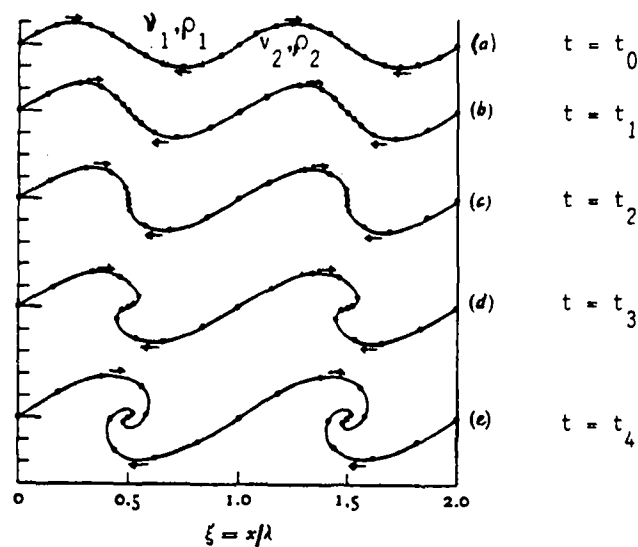


Figure 29: Cisaillement critique entraînant l'affouillement (Lane 1953 fide Graf 1971 p. 95)

1.5. Courants de turbidité

La turbulence a souvent été invoquée pour la genèse des convolutions des turbidites. Ces déformations chapeautent le niveau sablo-limoneux de rides (membre C de la série de Bouma). En plan, les convolutions se présentent sous forme de dômes et de pillars irréguliers et couchés.

La question s'est posée chez les hydrauliciens si l'instabilité de Kelvin-Helmholtz peut donner naissance aux convolutions (TURNER 1979, p. 92 sq) (fig. 30). Cette instabilité de cisaillement naît entre deux couches mues à des vitesses différentes. L'amplitude initiale des déformations s'accroît si le liquide supérieur s'écoule plus rapidement que le fluide sous-jacent. Or, dans le cas des courants de turbidité, la vitesse décroît vers le haut (ALTINAKAR 1988).



v : vitesse d'écoulement

ρ : masse volumique du fluide

Fig. 30: Instabilité de Kelvin-Helmholtz (fluide sans viscosité, $v_1 > v_2$, $\rho_1 > \rho_2$) (ROSENHEAD 1931, fide TURNER 1979 p. 96)

Les convolutions des turbidites proviennent vraisemblablement d'un glissement des laminations limoneuses qui ne sont pas encore consolidées sur leur substratum sableux.

2. RUPTURE SOUS CHARGE PONCTUELLE

- 2.1. Matériau: Graviers, sables, limons et argiles.
- 2.2. Milieu: Tout milieu soumis à des charges ponctuelles (chute de pyroclastes, dropstones, dépôts de blocs de glace, remplissage rapide de flute): delta, lac, etc.
Tout dépôt soumis à la poussée d'un glacier.
- 2.3. Etat déformé: - tassement
- ball-and-pillow, pocket.
- failles, chevauchement
- 2.4. Description

Suivant le degré de densité relative du sol, on distingue 3 sortes de rupture (VESIC 1973) (fig. 31):

- le poinçonnement (grande déformation du sol, rupture progressive sans soulèvement du sol),
- le cisaillement localisé (stade intermédiaire),
- le cisaillement généralisé (déformation faible et rupture brutale avec bourrelet à la surface).

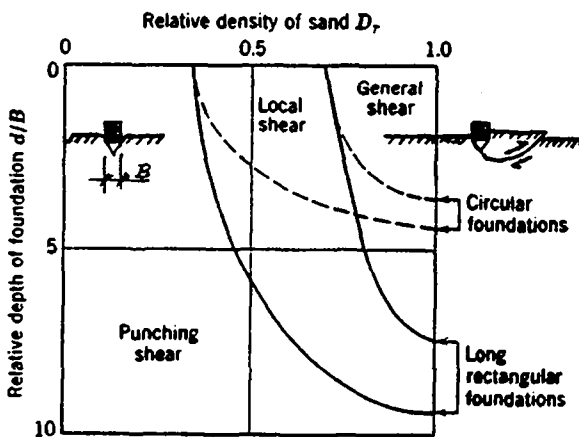


Fig. 31 : Mode de rupture d'un sol suivant sa densité relative

(VESIC 1963 fide LAMBE + WHITMAN 1969, p. 207)

Tous ces types de ruptures peuvent être assimilés à des glissements de sols plastifiés. Seulement dans le cas de la rupture généralisée, la surface de rupture est franche. C'est aussi là que le volume de sol plastifié est le plus grand. Comme les sédiments fraîchement déposés sont d'ordinaire lâches, la rupture par poinçonnement intervient le plus fréquemment.

En milieu saturé, et lors d'une application rapide de la surcharge, le sol se comporte initialement de manière non drainée. Toute la surcharge est transmise à l'eau. La résistance du sol en est ainsi bien réduite (angle de frottement interne et cohésion non drainés). De plus, un gradient hydraulique élevé règne autour de la surcharge. Sa direction dépend des rapports des perméabilités horizontales et verticales du sol et de la distribution des contraintes. Lors d'une circulation d'eau horizontale prépondérante, l'effet de butée du sol est diminué, ce qui contribue encore à diminuer la charge de rupture.

La figure 32 donne l'ordre de grandeur de la surcharge de rupture sous un bloc de 20 cm de diamètre. Les valeurs sont très basses, même si elles ne tiennent pas compte d'une surpression d'eau lors de l'arrivée du bloc. On comprend ainsi aisément la genèse de load casted flutes ou ripples décrite dans la littérature (DZULYNSKI et WALTON 1965 p. 148).

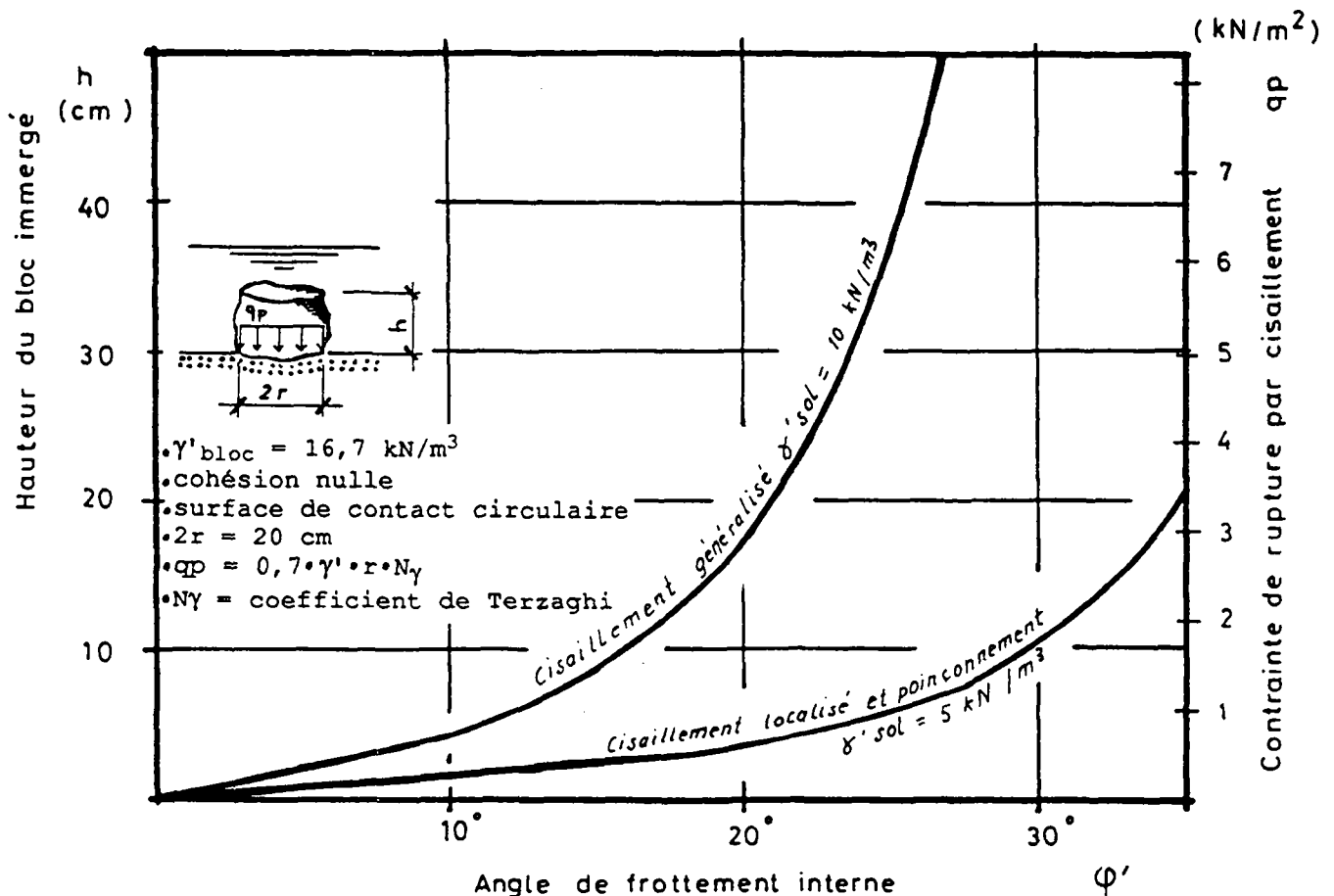


Fig. 32 : Contrainte de rupture du sol en fonction de l'angle de frottement interne

3. CRYOTURBATION

3.1. Matériau: Sol de perméabilité assez faible ($10^{-8} < k < 10^{-5}$ m/s):
les limons sont les plus sensibles au gel.

3.2. Milieu: Tout milieu soumis au gel; d'ordinaire le milieu est
non saturé en eau (environnement périglaciaire).

3.3. Etat déformé: En milieu non saturé, lors du gel:
- gonflement des sols suite à la formation des lentilles de glace
- tassement mineur dans le sol sous les lentilles
- fracturation des roches
- contraction du sol (formation des sols tétraogonaux)

En milieu non saturé, lors du dégel:

baisse de la résistance au cisaillement du sol:

- poinçonnement de la surcharge (ball-and-pillow, irregular contortions, pocket)
- mouvement de terrain: solifluxion (= glissement superficiel).

De nombreux cycles gel-dégel permettent le développement:

- des sols polygonaux (remontée des blocs à la surface)
- des sols striés sur les pentes

En milieu saturé et gelé

- glacier rocheux (éboulis dont la base gelée flue)

3.4. Description

Terrain non saturé

Le changement de phase de l'eau en glace modifie les équilibres de l'eau et de la vapeur dans le sol. Lors du gel, on constate les phénomènes suivants:

Squelette minéral: Les particules les plus fines sont entraînées vers le haut (expérience de CORTE).

Eau et vapeur: Les molécules d'eau migrent vers la zone gelée. Une lentille de glace dépourvue de particules minérales se constitue ainsi, emballée dans un film d'eau. Ce processus induit une réaction en chaîne: la baisse de la teneur en eau sous la lentille de glace provoque une diminution de la pression de vapeur, c'est-à-dire une augmentation de la succion capillaire; de nouvelles molécules d'eau sont aspirées vers la zone gelée (fig. 33).

Cette sous-pression amène un léger tassement du squelette.

Dans les sols graveleux, le transfert d'eau est limité. La baisse de la teneur en eau freine la migration de l'eau, car les interstices entre les grains sont grands. Dans ce cas, la lentille de glace ne peut pas se former (fig. 34 p. 72).

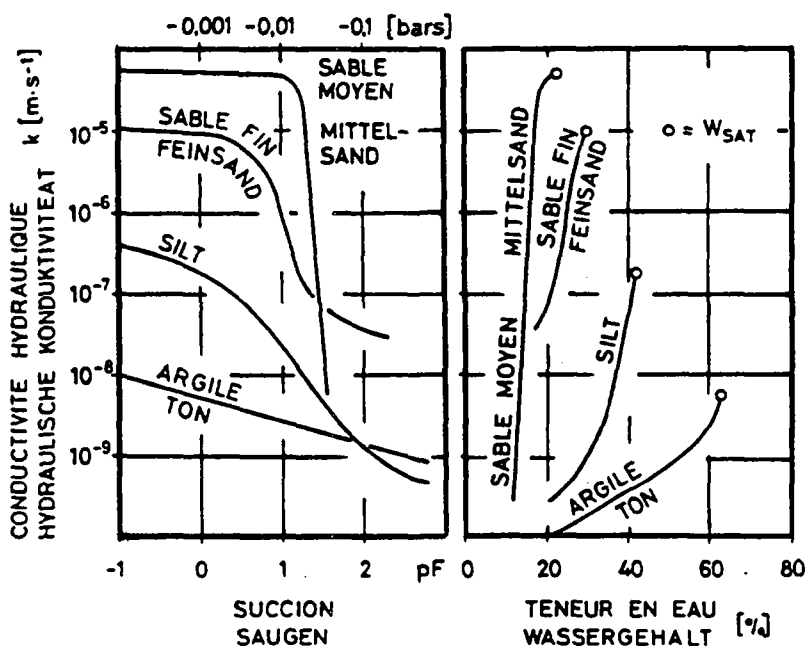


Fig. 33 Exemple de relation conductivité hydraulique - succion - teneur en eau pour des sols non saturés (Dysli 1983 p. 8).

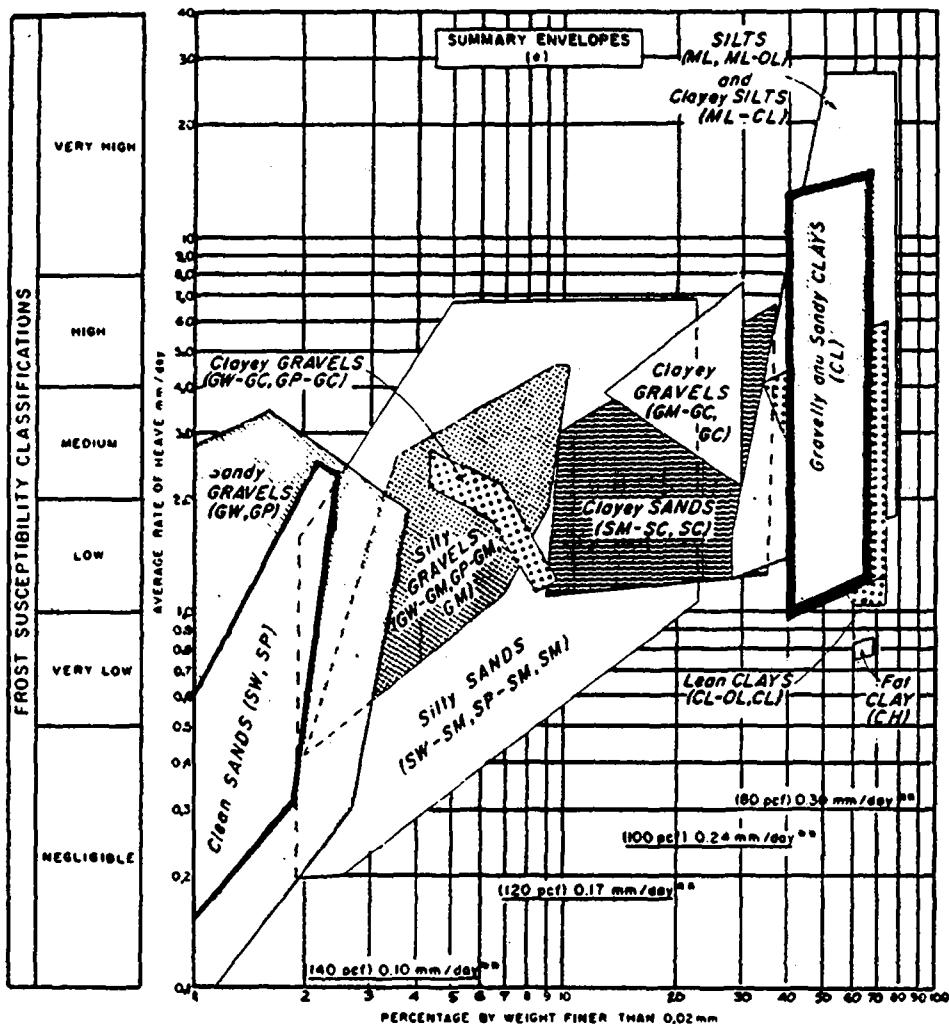


Fig. 34 : Vitesse moyenne de gonflement en fonction du pourcentage des grains $< 0,02$ mm et du type de sol (KAPLAR, 1974 fide DYSLI 1983 p. 34)

Lors du dégel, une grande quantité d'eau se trouve accumulée à l'emplacement de la lentille de glace. Comme le terrain est peu perméable, cette eau va s'écouler très lentement sous l'effet du poids des couches supérieures. Il existe alors dans le sol un coussin d'eau qui n'offre aucune résistance au cisaillement (fig.35 p. 73). Le poinçonnement des couches supérieures - avec ou sans nouvelle surcharge - devient possible. La cryoturbation est donc un cas particulier de déformations par poinçonnement.

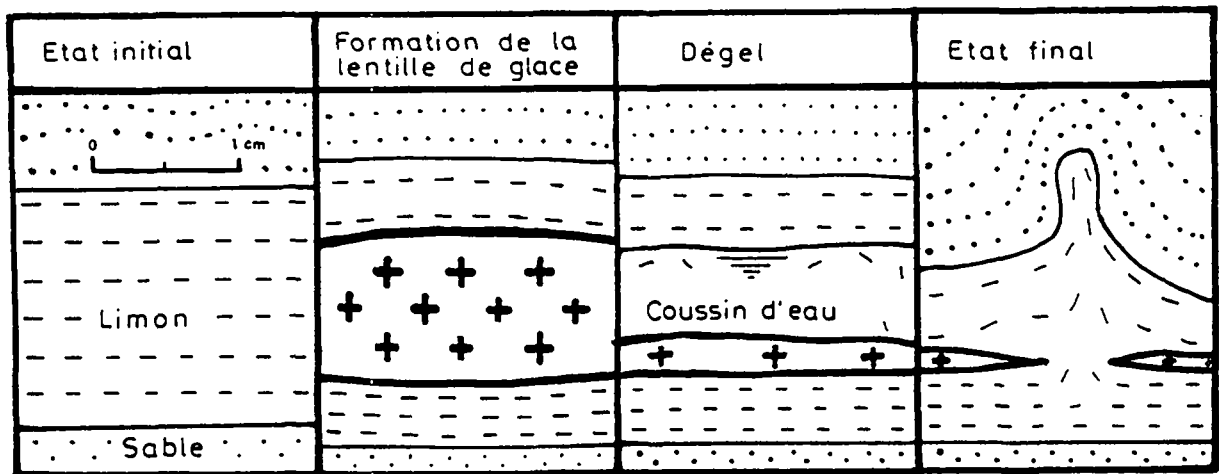


Fig. 35: Cryoturbation dans les limons non saturés.

Terrain saturé

Comme la phase gazeuse n'existe pas, le gel se distribue de manière homogène, sans accumulation sous forme de lentille. Le sol se dilate. Il retrouve son état initial lors du dégel.

Quant au delta de Granges, la cryoturbation n'y a pas exercé ses effets.

Pendant la formation du delta, la circulation des eaux souterraines dans les top-sets empêche la pénétration du gel. De plus, les déformations ne sont pas limitées aux strates gélives, mais ont affecté les sables.

Après l'exondation du delta, il est difficile d'imaginer que le gel pénètre sur plus de 5 m d'épaisseur dans les top-sets. Le cas échéant, les déformations auraient modifié l'ensemble des couches et non seulement 3 niveaux. On aurait aussi constaté des reliques de sols cryoturbés semblables à ceux que CAMPY et PHARISAT 1976 ont décrit (voir annexe 8).

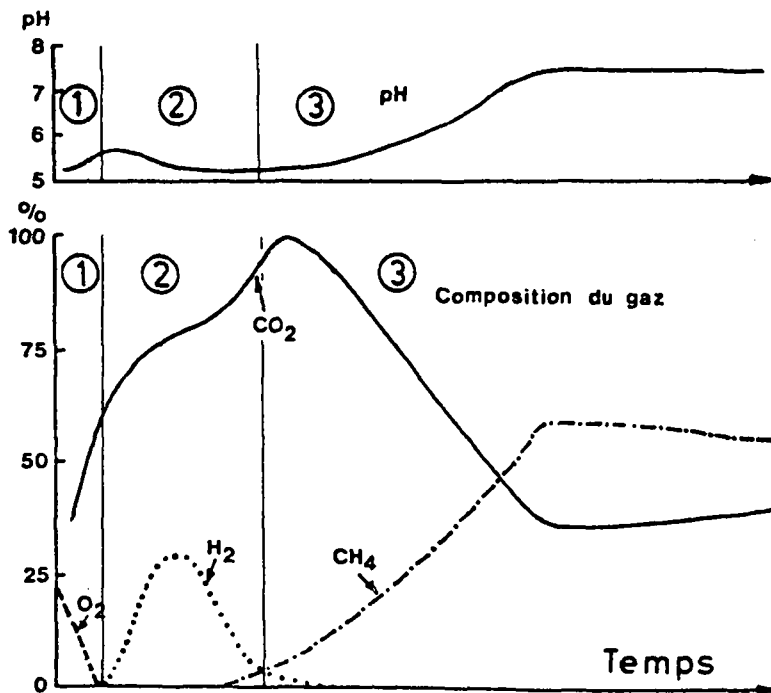
4. DEGAZAGE DES SEDIMENTS

- 4.1. Matériau: Tout dépôt fin contenant de la matière organique.
- 4.2. Milieu: Milieu réducteur à teneur en eau élevée, marécages, etc.
- 4.3. Etat déformé: Pillar de petite taille sur les premiers centimètres de sédiments fraîchement déposés et volcanoes à la surface.
- 4.4. Description:

La matière organique déposée au fond d'un lac ou d'un marécage se dégrade grâce à une succession complexe de processus biologiques. Tout d'abord on observe la disparition de l'oxygène, due à l'activité respiratoire des bactéries aérobies. Le milieu devient anaérobie (fig. 36 p. 75).

"Certains organismes obligatoirement aérobies (c'est-à-dire ayant un besoin absolu d'oxygène pour vivre) vont disparaître, ou tout au moins ne se développent plus. D'autres, les anaérobies facultatifs, changent leur mode de vie: de la respiration aérobie, ils passent à certaines fermentations, engendrant des quantités importantes d'acides organiques et d'alcools, de gaz carbonique et d'hydrogène moléculaire. On observe alors une phase de production gazeuse, avec un mélange d'hydrogène et de gaz carbonique. Simultanément, on note la disparition (s'il y en avait) des nitrates, que certaines bactéries sont capables d'utiliser pour respirer en remplacement de l'oxygène (phénomène de dénitrification).

A la suite de cette phase, la production de gaz ralentit considérablement. L'hydrogène disparaît progressivement, remplacé par le méthane. La proportion de ce dernier gaz croît jusqu'à atteindre environ 60%. Le pH s'élève, suivi par une augmentation importante de la production gazeuse. Simultanément, on observe une réduction des ions sulfatés avec apparition d'hydrogène sulfuré qui forme, en présence d'ions ferreux, un précipité noir de sulfure de fer. On arrive alors dans une phase de production intense d'un mélange à peu près stable de "biogaz" (60% CH_4 et 40% CO_2), qui s'accompagne d'un abaissement de la teneur (...) en matière organique. Finalement, suite à l'épuisement du substrat, la production du biogaz diminue à son tour, tandis que sa composition varie peu." (ARAGNO 1985, p. 43).



- ① Disparition de l'oxygène grâce aux bactéries aérobies
- ② Activité anaérobie: hydrolyse enzymatique de la cellulose, des protéines, lipides, etc, en sucres acides aminés et acides gras. Fermentation: production de H₂, CO₂, acétate, alcools, etc. Acétogénèse à partir des alcools.
- ③ Méthanogénèse à partir de: $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ et de l'acide acétique: $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$.

Fig. 36: Diagramme de l'évolution des émissions gazeuses en milieu réducteur (ARAGNO 1985 p. 42)

Il est difficile d'invoquer ce mécanisme pour la genèse des déformations de Granges et certainement pour beaucoup d'autres sites plus riches en matière organique et en argiles.

Soulignons cependant le rôle de la migration horizontale des bulles pour la formation de grosses bulles de plusieurs centimètres. Celles-ci peuvent alors traverser leur couverture de sédiments, en marquant leur passage à la surface par un petit cratère ("volcanoe") (cf annexe 7.5 p. 226).

5. BIOTURBATION

5.1. Matériau: Sols fins possédant à l'origine de la matière organique.

5.2. Milieu: Tout milieu saturé ou non où la vie est possible (taux de sédimentation lent, température adéquate, etc.).

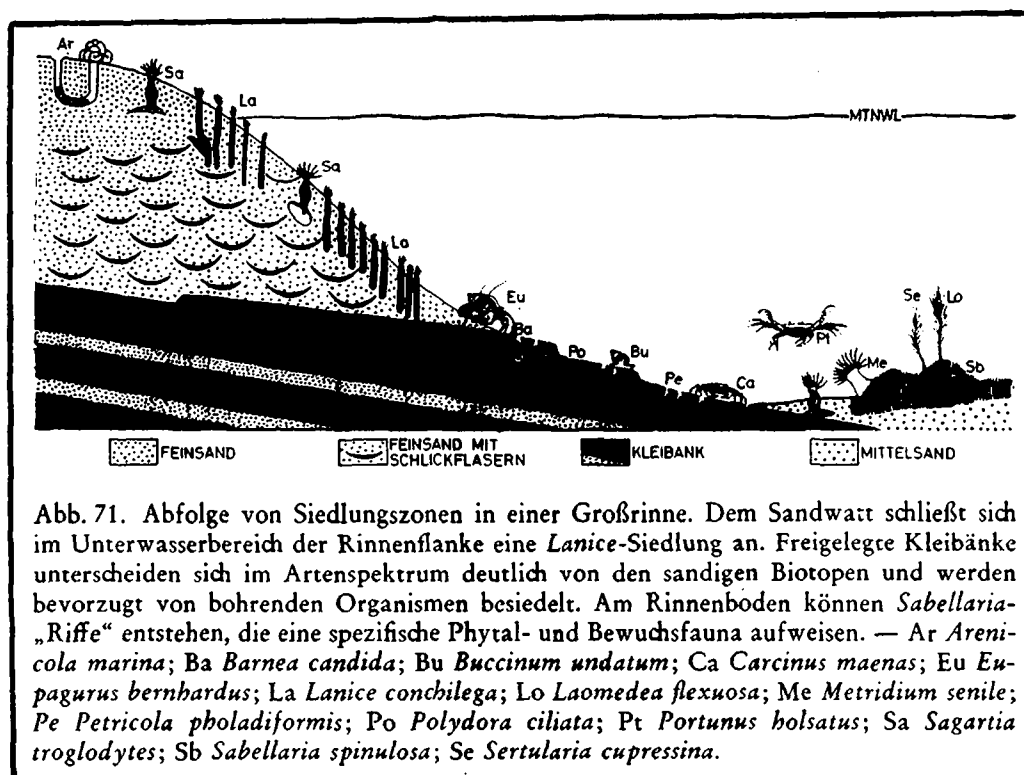
5.3. Etat déformé: - "Bore hole"

- "traces fossiles": traces de séjour, de locomotion, de nutrition, de rejets alimentaires des organismes.

- destruction des structures sédimentaires.

5.4. Description:

Les organismes qui choisissent d'ordinaire des milieux abrités, vivent de la matière organique contenue dans le sol. Leurs activités se manifestent par des "traces fossiles" à la surface des dépôts (fig. 37). A l'intérieur, la structure initiale du sol peut être complètement oblitérée (GOLDRING 1979).



MTNWL : mittlere Niedrigwasserlinie

Fig. 37 : Zones de colonisation dans un chenal tidal (REINECK 1978, p. 140))

Nous n'avons observé aucune "trace fossile" à Granges. Ce milieu deltaïque était trop inhospitalier pour la vie: l'eau ne pouvait pas se réchauffer à cause de l'environnement glaciaire.

6. RUPTURE PAR CISAILLEMENT INDUISANT UN GLISSEMENT

- 6.1. Matériau: Dépôt possédant une faible résistance au cisaillement (argiles, limon, sables liquéfiés)
- 6.2. Milieu: Tout milieu.
- 6.3. Etat déformé: Plis (anticlinaux et synclinaux), convolutions
failles
irregular contortions
olistholithes (blocs glissés)
slump (glissement sous-marin comprenant des plis)
turbidite (cf. chapitre 1)

6.4. Description

Un dépôt est instable si la résistance au cisaillement du sol est inférieure aux forces motrices. Celles-ci sont déterminées par la pente et la géométrie du dépôt (fig. 38).

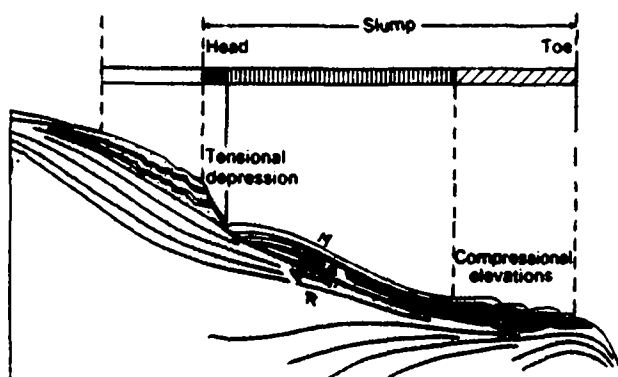


Fig. 12.6. Diagrammatic cross-section of a submarine slump on a gentle slope (from Lewis, 1971).

R: résistance au cisaillement du sol

M: force motrice

Fig. 38 : Coupe à travers un slump (d'après LEWIS 1971, fide RUPKE 1978 p. 375)

Différents facteurs peuvent augmenter les forces motrices et entraîner la rupture: par exemple l'arrivée d'un nouveau dépôt (augmentation du poids, cf. "quick clay"), son émergence ou son immersion (force de percolation parallèle à la pente, cf. glissement de la Vraconne près de Ste-Croix, VD, du 25.9.1987).

Des vibrations en revanche affectent directement la résistance au cisaillement qui peut chuter (cf. chapitre 10).

Les problèmes de stabilité sont d'ordinaire résolus de manière déterministe. On part de caractéristiques géotechniques moyennes (angle de frottement interne, cohésion) pour déterminer par itération la surface de rupture au coefficient de sécurité le plus faible (coefficient de sécurité: rapport des forces stabilisantes sur les forces motrices). Un calcul de sensibilité sur les paramètres géotechniques peut être effectué une fois la géométrie du glissement connue.

Les recherches actuelles tentent plutôt d'adapter le calcul au mode réel de rupture d'un glissement.

La rupture se développe en fait à partir du point de plus faible d'une pente ("rupture progressive"). Ce point n'est pas forcément situé au bas de la pente. La rupture progresse jusqu'à la surface en cherchant toujours les zones de plus faible résistance. Il arrive que le plan de rupture s'arrête sur un horizon particulièrement résistant, qui empêche ainsi le glissement (état absorbant d'une chaîne de MARKOV, OBONI et al., 1984).

A Granges, un gros paquet de fore-sets sablo-graveleux a glissé en direction du centre du delta (situation fig.4 p.8). Ce type d'instabilité est fréquent dans l'environnement glaciaire: la fonte de lambeaux de glace enfouis sous les sédiments libère une masse d'eau qui se fraie un passage dans la couverture par des pillars. Puis les sédiments s'effondrent à l'emplacement de la glace fondue ("kettle").

7. GONFLEMENT DES ARGILES

- 7.1. Matériau: Groupe des smectites et des vermiculites et interstratifiés comportant des smectites et des vermiculites.
- 7.2. Milieu: Milieu non saturé ou fortement confiné par la pression géostatique.
- 7.3. Etat déformé: - Bombement (par exemple lors d'excavations en sous-terrain où les contraintes naturelles sont modifiées).
- Diapir (saturation d'un milieu non saturé).
- 7.4. Description:

On distingue les smectites dioctaédriques (montmorillonite, beidellite, nontronite et vulkhonskoite) et les smectites trioctaédriques (saponite, hectorite, stevensite, sauconite et leMBERGITE).

Les vermiculites ($\text{Mg}_3(\text{SiO}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot \text{Mg}_{0,5}(\text{H}_2\text{O})_{4,0}$) présentent des caractéristiques minéralogiques analogues aux smectites. Elles se distinguent par des charges électriques de feuillets plus élevées (BRINDLEY et BROWN 1980, p. 98 et p. 199 sq.).

L'illite, qui se définit comme un mica potassique dioctaédrique donnant un pic de diffraction à $n \cdot 10 \text{ \AA}$, ne fait pas l'unanimité quant à son comportement. Pour BRINDLEY et BROWN 1980 p. 275, cette argile est stable, tandis que MADSEN 1976 p. 36 démontre son gonflement avec l'eau.

Nous décrirons le comportement de la montmorillonite qui est l'argile gonflante la plus connue.

Les montmorillonites $(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mg}, \dots)_2 (\text{Si}_4\text{O}_{10})^- (\text{OH})_2^- (\text{Ca}, \text{Na} \dots)_x \cdot n \text{ H}_2\text{O}$ sont des phyllosilicates où chaque feuillet est composé de deux arrangements d'atomes (O^{2-} , Si^{4+} et Al^{3+}) en tétraèdres et d'un arrangement (O^{2-} , $(\text{OH})^-$, Al^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} , etc.) en octaèdre. Deux octaèdres sur trois sont en moyenne occupés, c'est pourquoi on parle de smectite dioctaédrique. Bien que la charge électrique d'un feuillet soit statistiquement en équilibre, les substitutions isomorphes et les vides créent localement des potentiels négatifs qui vont être compensés par l'arrivée

de cations et d'eau entre les feuillets et les plaquettes (théorie de la double couche électrique) Les feuillets sont maintenus ensemble uniquement par des forces de Van-der-Waals qui sont relativement plus petites que les forces ioniques. Ainsi les montmorillonites se débitent très facilement en plaquettes de toute dimension, et l'on obtient pour ces minéraux une surface spécifique allant jusqu'à $1000 \text{ m}^2/\text{g}$.

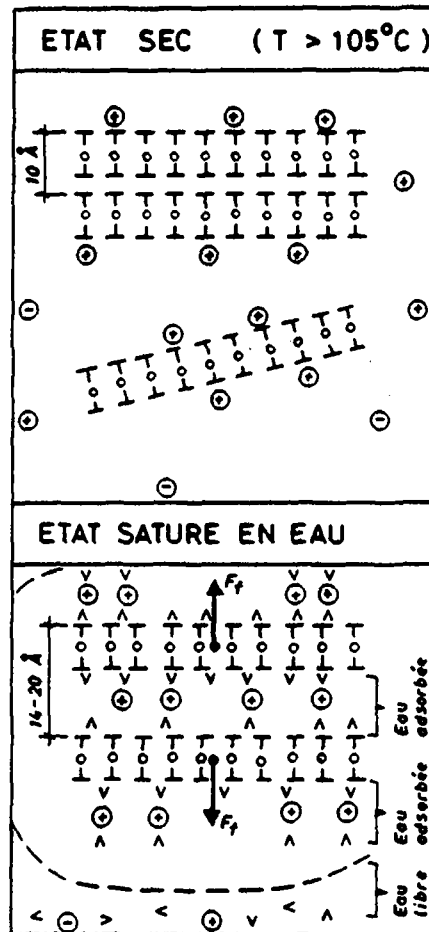
Lorsque l'eau libre est saturée en cations - par exemple l'eau de mer - les doubles couches des feuillets et des plaquettes tendent à disparaître, on assiste alors au phénomène de la floculation, car les feuillets ne se repoussent plus.

Des cations (Na^+ , Mg^{++} , K^+ , Ca^{++} , Li^+ , Si^{++} , Cs^+ , Ba^{++} , NH_4^+ , etc.) et de l'eau pénètrent entre les feuillets et les plaquettes lorsque les conditions physico-chimiques changent, soit lors:

- d'une réduction de la pression du sol ou de la roche (par exemple par un forage ou le creusement d'un tunnel),
- d'une diminution de la concentration cationique de l'eau libre du terrain.

Une différence de concentration donne naissance à la force osmotique, la limite de la double couche se comporte alors comme une membrane semi-perméable au travers de laquelle s'effectuent les échanges de cations (fig. 39). Cette double couche est plus visqueuse que l'eau libre: elle influence ainsi directement les caractéristiques géotechniques du sol (perméabilité, limites d'Atterberg, etc.).

Si les déformations mesurées en laboratoire sur des marnes tertiaires non saturées de la Suisse sont peu importantes - quelques pourcents - elles peuvent atteindre 40% dans un sol remanié et compacté contenant 90% de montmorillonite (KABBAJ 1981). Le gonflement dépend bien sûr des conditions initiales de l'essai et du type d'appareillage. MADSEN 1976 présente dans sa thèse une méthode de calcul du gonflement lors de l'hydratation.



LEGENDE :

—○— FEUILLET DE MONTMORILLONITE

⊕ CATION

⊖ ANION

Λ MOLECULE D'EAU

--- LIMITE D'UNE DOUBLE COUCHE ELECTRIQUE

F_f FORCE OSMOTIQUE DUE A LA DIFFERENCE DE CONCENTRATION ENTRE L'EAU LIBRE ET L'EAU ADSORBEE

Fig. 39 : Double couche électrique autour de la montmorillonite à l'état sec et saturé en eau (théorie de Derjaguin-Landau-Verney-Overbeek (DLVO))

En conclusion, les montmorillonites et vermiculites de Granges n'ont pas pu gonfler lors de leur dépôt, car elles se trouvaient dans un milieu saturé et peu minéralisé. Lors de leur émergence, ces argiles se sont partiellement déshydratées, et le sont restées jusqu'à nos jours. Leur quantité est insuffisante (<5% du pourcentage pondéral) pour provoquer des déformations sensibles.

Remarque sur la thixotropie

Après le dépôt d'une argile, les particules se réarrangent lentement pour former une structure tridimensionnelle (MITCHELL 1960).

Les paillettes argileuses se déplacent de telle manière à minimiser l'énergie de répulsion à l'intérieur de la double couche. En fin de processus, les argiles ne sont plus du tout empilées les unes sur les autres, mais forment un réseau de plaquettes disposées plus ou moins orthogonalement entre elles (fig. 40). Une secousse peut provoquer l'effondrement de la structure qui est sensible comme un château de cartes ("comportement thixotropique").

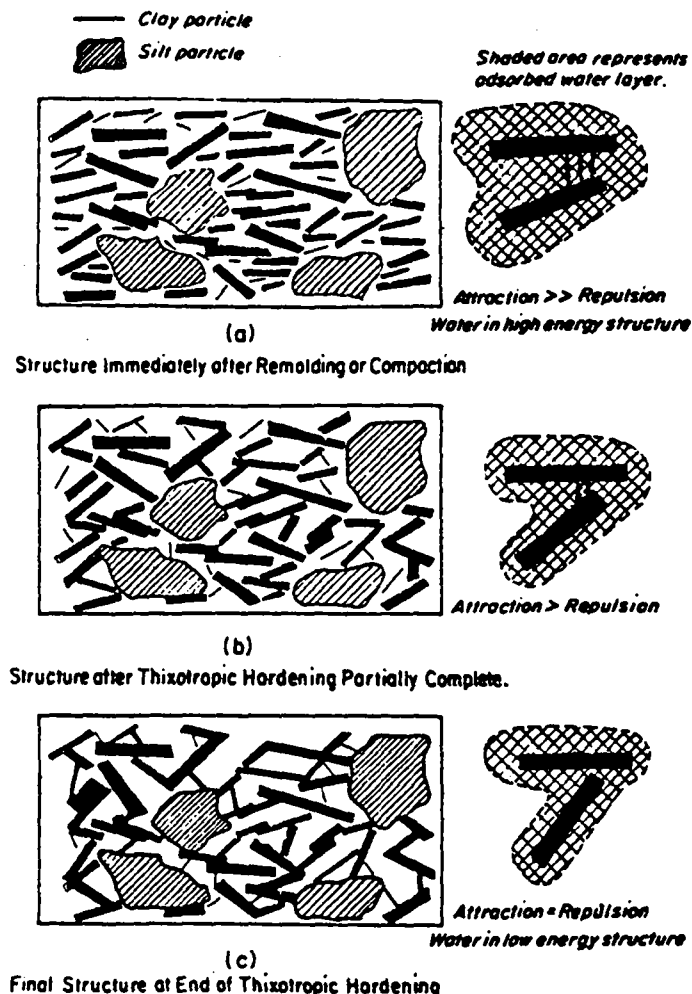


Fig. 40: Schéma montrant le changement de structure thixotropique des argiles avec le temps (MITCHELL 1960, p. 30).

8. FLUAGE

8.1. Matériau: Argile, NaCl, gypse, anhydrite, glace.

8.2. Milieu: Milieu saturé.

8.3. Etat déformé: Dôme
 glissement.

8.4. Description

Sous l'effet de différences de contraintes appliquées à un milieu, celui-ci se déforme lentement ("fluage déviatorique" de Vulliet 1986 et "convection gravitationnelle" de Rambert 1968). Ces différences ont leur origine dans la géométrie des dépôts comme leur pente ou des irrégularités d'interface.

Le milieu est défini par

- sa densité,
- sa viscosité dynamique (μ) et
- des constantes reliant les vitesses de déformations aux contraintes.

On peut difficilement parler de rupture dans un tel milieu. Il se réorganise au sein d'une masse visqueuse comportant des discontinuités (plans de glissement, failles, etc.).

Ce mode de déformation ne s'applique que s'il existe une relation entre les contraintes et les vitesses de déformation. Ces vitesses sont négligeables en présence d'un milieu granulaire (limon, sable, gravier).

9. LIQUEFACTION PAR SURCHARGE APPLIQUEE RAPIDEMENT

9.1. Matériau: Sables, limons et argiles lâches (vases).

9.2. Milieu: Tout milieu à taux de sédimentation élevé (chenal, delta, plage, estuaire).

9.3. Etat déformé: Structures de consolidation (fig. 41 p. 87)

- sand dyke, pillar et diapir
- dish structure
- volcano à la surface
- mud lump.

9.4. Description

Lorsque des sédiments se déposent rapidement - par exemple à la fin d'une crue, dans un chenal - l'eau contenue dans le substratum supporte d'abord toute la surcharge. Cette haute pression interstitielle affaiblit la résistance au cisaillement du sol τ , suivant la célèbre loi de Coulomb et Terzaghi

$$\tau = c' + (\sigma - u) \operatorname{tg} \phi'$$

où τ = résistance au cisaillement (kN/m^2)

c' = cohésion effective

σ = contrainte normale totale

u = pression interstitielle

ϕ = angle de frottement interne effectif

Cette surpression peut entraîner la rupture du sol seulement si:

- le sol ne possède aucune cohésion;
- sa perméabilité est faible, empêchant une rapide dissipation de la surpression d'eau (limons, sables).

Les sédiments les plus vulnérables appartiennent donc à la classe des limons et des sables.

Nous allons distinguer deux cas:

- le dépôt de sédiments grossiers sur un lit fin,
- le dépôt de sédiments fins.

9.4.1. Dépôts de sédiments grossiers sur un lit fin

Avant le dépôt de sédiments grossiers, une partie de la couverture lâche du lit fin d'un chenal est érodée par turbulence. Puis le dépôt se constitue d'ordinaire rapidement, en provoquant une surpression interstitielle au sein du lit. Cette surpression induit un écoulement d'eau ascendant qui a tendance à soulever les grains (forces de percolation) (fig. 41 p. 87).

Nous exposons à l'annexe 7 les méthodes de calcul ainsi que leur application au delta de Granges et nous en tirons les résultats suivants:

- En présence d'une surcharge uniforme (consolidation verticale uniquement), un entraînement généralisé de la couche de support est impossible: par définition, les forces de percolation sont toujours inférieures à la surcharge.
- Si le lit et la surcharge ne sont pas homogènes (présence de structures sédimentaires), les gradients hydrauliques régnant dans la couche de support sont suffisamment grands pour entraîner les plus petits grains par des cheminements préférentiels (pillars). Ces pillars peuvent transpercer la couche de la surcharge pour s'étaler à la surface autour d'un cratère (volcanoe).

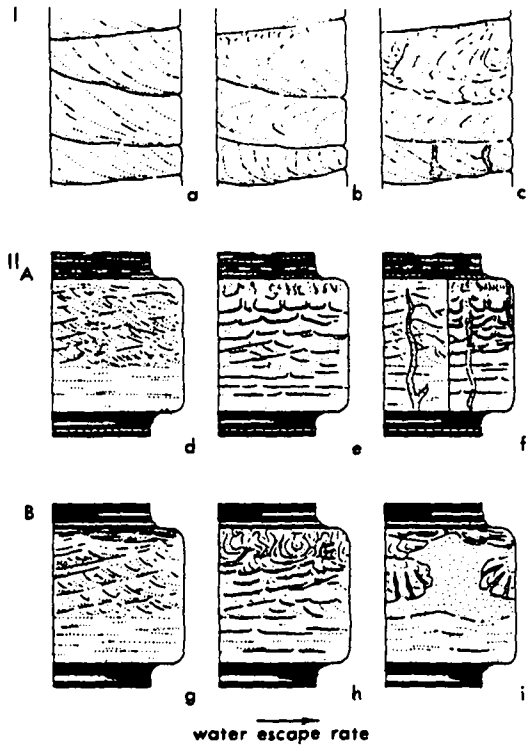


Fig. 151. Common relationships among sediment grain size, strength, primary sedimentary structures, water escape rates, and consolidation structures in natural deposits. I Sequence of medium- to coarse-grained cross-stratified sands such as occur in many alluvial and shallow marine deposits: a unmodified primary structures; b repeated liquefaction coupled with current drag acts to produce oversteepened and recumbent-folded deformed cross-bedding; c at higher water discharge rates, local liquefied intrusions and small Type B pillars evolve. II Turbidite-type beds showing Bouma B, C, D, and E subdivisions. A Bed with noncohesive C and D subdivisions: d unmodified primary structures; e at discharges just above those characterizing pure seepage, elutriation and redistribution of mobile grains in B subdivision forms flat consolidation laminations and small Type A pillars. Collapse of loosely packed sand in C subdivision results in partial liquefaction and wide development of Type A pillars and strongly curved dishes. Bed surface is fully fluidized forming layer of free surface pillars; f at highest discharge rates, structures formed depend on rate of discharge increase. If discharge rises abruptly, large Type B pillars may develop across unmodified primary structures (left); if discharge increases gradually, large Type B pillars can form cross-cutting lower-discharge consolidation structures (right). B Bed with cohesive upper C and D subdivisions: g unmodified primary structures; h similar structures evolve as in e at low dewatering rates in non-cohesive layers. Cohesive upper layers resist fluidization and deform hydroplastically into convolute lamination; i at highest water escape rates, bed is fully liquefied; large liquefied intrusions and coupled subsidence lobes showing stress pillars develop. (After Lowe 1975)

Fig. 41: Structures sédimentaires de consolidation (LOWE 1975 fide REINECK + SINGH 1980 p. 94)

- Lorsque la surcharge n'est pas uniforme, la consolidation verticale est accompagnée d'une circulation d'eau horizontale. Les filets de courant se concentrent dans les zones de moindre contrainte. Des diapirs peuvent aussi s'y former.
- Lorsque les diapirs se créent, ceux-ci contribuent à décompresser la couche en cours de consolidation: les surpressions d'eau diminuent rapidement grâce aux conduits que l'on peut comparer à des drains verticaux. Ainsi, la consolidation est accélérée.

2.4.2 Dépôt de sédiments fins

En fin de crues, une avalanche de sédiments peut s'accumuler sur un lit fin. On assiste alors à la formation spontanée de pillars dès que l'apport de sédiments dépasse, par exemple, 11 cm en 10 minutes avec les limons de Granges (annexe 6).

Ces structures sont habituelles dans les niveaux D des turbidites (cf. BOUMA 1962 annexe 8).

Cette génération spontanée est bien connue dans les vases argileuses et a été reconstituée en laboratoire par les essais de Dangeart et al. 1964 (annexe 9 p. 244).

En conclusion, les figures sédimentaires de consolidation s'expliquent par les hauts gradients régnant lors de la mise en place d'une surcharge. Ces gradients permettent l'entraînement des particules dans des pillars. Ces structures sédimentaires accélèrent le processus de consolidation, car les surpressions interstitielles décroissent plus rapidement.

10. LIQUEFACTION SOUS L'EFFET D'UN SEISME

10.1. Matériau: Sables et limons saturés.

10.2. Milieu: Tout dépôt proche d'un épigentre sismique.

10.3. Etat déformé: Tassement.

Failles, glissements, slumps.

Ball-and-pillows et pocket.

Irregular contortions.

Dish, pillar et diapir.

10.4. Description

Lorsqu'une onde parcourt un sol, les particules sont soumises à des efforts de compression, de traction et de cisaillement. Ces forces font perdre petit à petit le contact entre les grains, les contraintes effectives diminuent jusqu'au moment où le sol est dans un état liquéfié (tableau 15 p. 90).

Suivant son degré de compacité, deux comportements du sol sont possibles. Si le sol est dense, de petites déformations vont apparaître qui permettent de recréer le contact entre les grains. Le sol se dilate et le processus de liquéfaction s'arrête (CASAGRANDE 1976 fide SEED 1976).

En revanche, lorsque le sol est lâche, il se tasse sous l'effet des ébranlements. Lorsque les surpressions interstitielles ne peuvent pas se résorber, le sol subit de grandes déformations.

Les sables et les limons lâches sont particulièrement sensibles à la liquéfaction car leur perméabilité est trop faible pour que les surpressions interstitielles puissent se dissiper rapidement. De plus, l'absence de cohésion ne leur ménage aucune réserve de résistance au cisaillement quand l'angle de frottement interne chute.

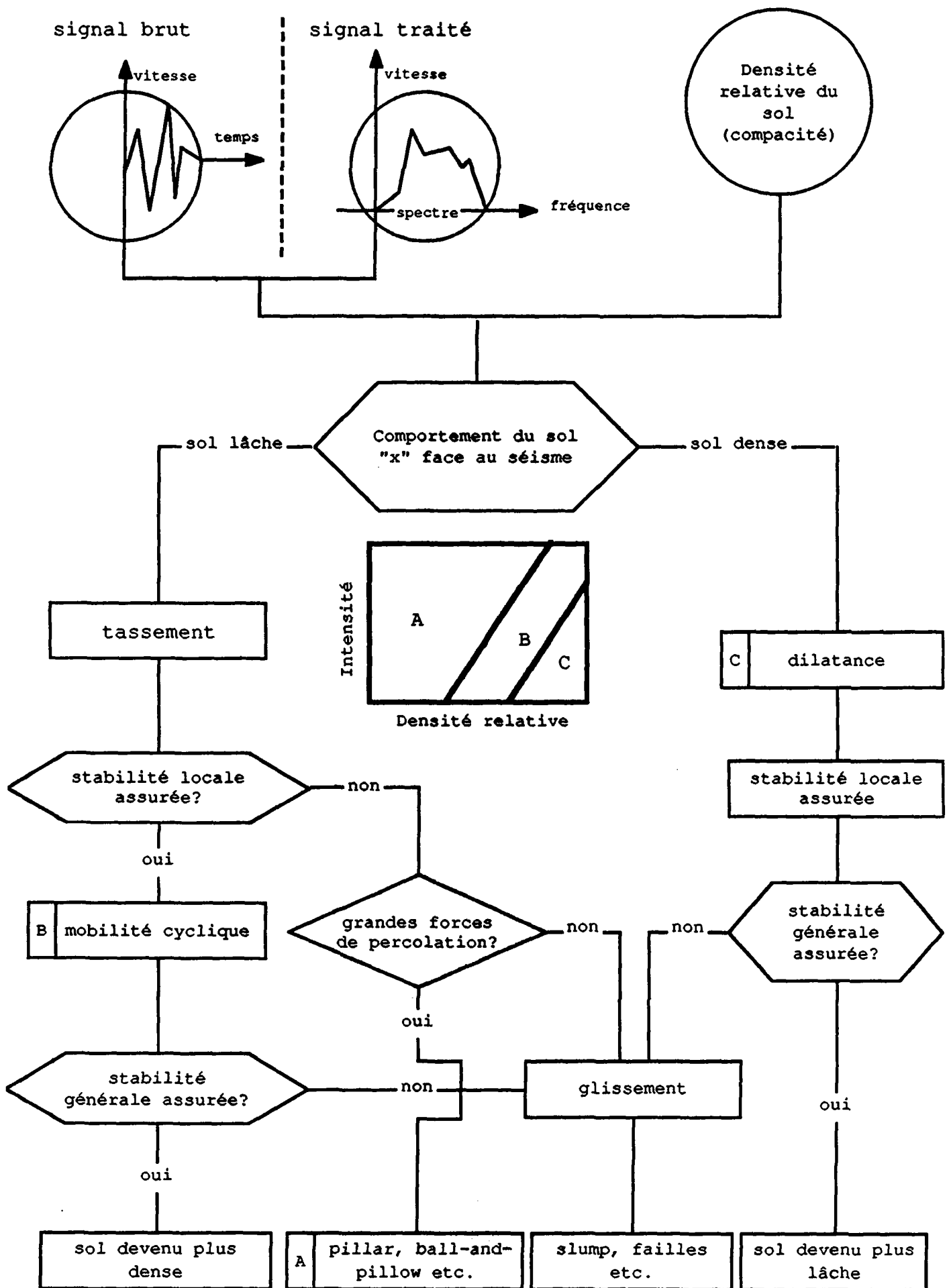


Tableau 15: Comportement du sol face aux séismes

Suivant la géométrie du dépôt et les conditions de drainage, la rupture ou l'instabilité peut intervenir bien après le séisme, grâce à la transmission des pressions interstitielles dans des zones plus vulnérables (BOSSONET et al. 1981, p. 445). C'est pourquoi il est si important de vérifier la stabilité générale de l'ensemble d'un dépôt. Les essais à la cellule triaxiale ne donnent qu'une réponse ponctuelle et seuls les modèles mathématiques permettent de simuler les conditions de drainage variant à l'intérieur des couches (FINN, LEE and MARTIN 1976, programme FLUSH à l'EPFL, etc.).

SEED (Comm. Earthqu. Eng. 1985) a mis au point des procédures simplifiées utilisant les résultats du Pénétromètre Dynamique Standard (SPT). Ces approches sont présentées à l'annexe 7.2 p. 205.

La méthode de POULOS et al. 1985, figurant dans la même annexe, est intéressante parce qu'elle s'attache à connaître uniquement la résistance résiduelle d'un sol liquéfié.

10.5. Analyse de la source sismique d'origine tectonique

Les tremblements de terre sont causés par les déplacements des plaques lithosphériques. Une plaque se compose de la croûte océanique ou continentale - épaisse de 10 à 50 km - et de la partie supérieure du manteau. Tous leurs mouvements relatifs occasionnent des ruptures qui engendrent des secousses sismiques.

Celles-ci sont transmises dans la croûte sous forme d'ondes de compression et de cisaillement. Proches de la surface, ces ondes sont réfractées dans les couches sédimentaires et donnent naissance aux ondes de distorsion de Rayleigh et de Love.

Ainsi les effets d'un séisme dépendent beaucoup de la nature des terrains superficiels et en particulier des sols meubles. Chaque point de la surface recevra un signal différent où la part des hautes fréquences des ondes de compression est plus ou moins oblitérée. Les terrains meubles sont définis comme des "passe-bas" par les géophysiciens (tableau 16 p. 92).

Le signal brut peut être présenté sous forme synthétique par un spectre de réponse des déplacements, des vitesses et des accélérations maximales en fonction des fréquences. Ce spectre ne fournit ainsi aucune information sur la durée d'un séisme. Cette donnée est essentielle pour le comportement de la pression interstitielle.

| Intensité MSK | Vitesse horizontale (m/s) | Accélération horizontale | Accélération verticale | Fréquence (Hz) | Durée (s) |
|------------------|---------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------------------|--------------|
| VI | 0,02-0,08 | (0,03-0,1) g | 0,5 à 1,7 • accélération horizontale | roche: 1 à 200 Hz sol: 0,2 à 50 Hz | 1- 4 |
| VII | 0,04-0,2 | (0,06-0,3) g | | | 2-10 |
| VIII | 0,1 -0,5 | (0,1 -0,7) g | | | 5-40 |
| IX | 0,3 -1,0 | (0,3 -1,6) g | | | 10-80 |

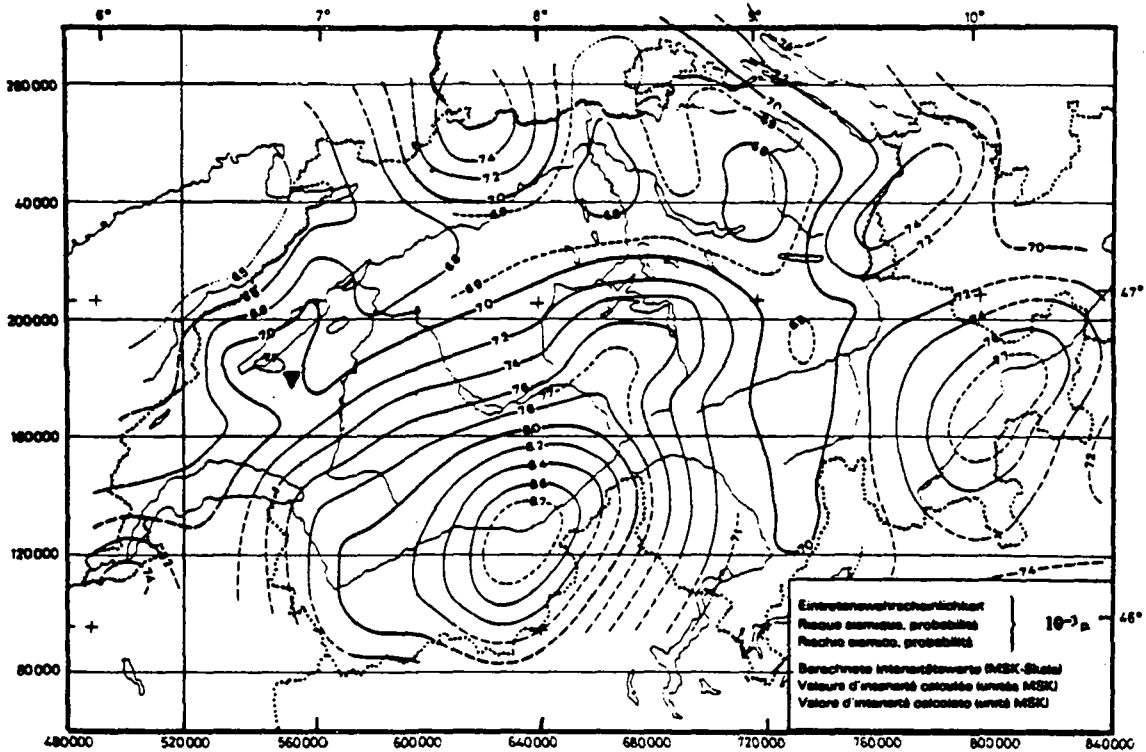
MSK = Medvedev - Sponheuer - Karnik 1964

g : accélération de la gravité

Tableau 16: Caractéristiques des tremblements de terre

10.6. Sismicité de la région de Granges

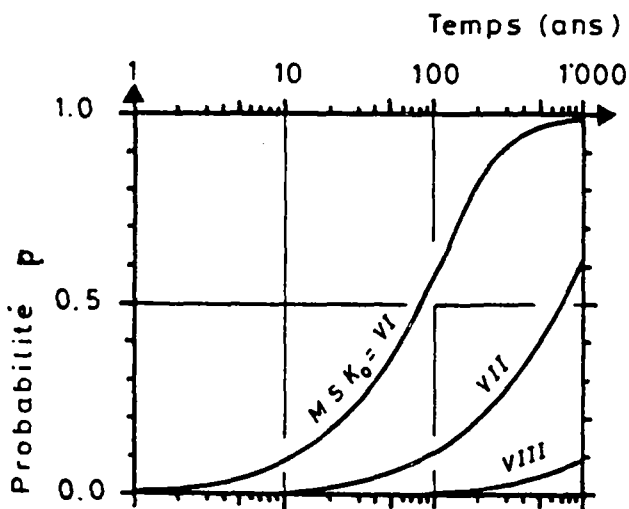
Le secteur de Granges se trouve hors des principales régions à forte sismicité, c'est-à-dire loin des hautes vallées alpines (Haut-Valais et Engadine) et du graben rhénan. Néanmoins sur un long laps de temps - par exemple en 1000 ans - les travaux de SAEGESSER et MAYER-ROSA 1978 révèlent que le site a connu des tremblements de terre d'intensité MSK VII à VIII (p.ex. le 12.8.1933), mais que depuis l'an 1000, seuls Bâle en 1356, Engelberg en 1601 et Brigue en 1855 ont vécu des secousses d'intensité MSK IX. SAEGESSER et al. 1978 ont établi des cartes de risques sismiques couvrant toute la Suisse (fig.42 p.93). A Granges, on obtient une probabilité théorique de 63% pour qu'un tremblement de terre d'intensité MSK VII ait lieu en 1000 ans (fig. 43 p. 93).



▼ delta de Granges

Intensité MSK de 7: dégâts aux immeubles, glissements de digues et de berges de rivières, etc.

Fig. 42 : Carte de risques sismiques (probabilité moyenne annuelle: p) (SAEGESSER et MAYER-ROSA 1978, carte 2)



$$p = \left(\frac{T_1}{n} \right) p^n (1-p)^{T_1-n}$$

T_1 = nombre d'années d'observation
 n = nombre d'événements apparaissant en T_1
 p = probabilité annuelle moyenne

A Granges $p = 10^{-2}$: IMSK = 6
 $p = 10^{-3}$: IMSK = 7
 $p = 10^{-4}$: IMSK = 8

Fig. 43 : Probabilité de risque sismique à Granges selon SAEGESSER et MAYER-ROSA 1978

En conclusion, il est plausible qu'un tremblement de terre d'intensité MSK VI ou VII ait provoqué un niveau de déformations à Granges. En revanche, la présence de plusieurs niveaux déformés successifs rend improbable une succession rapprochée de séismes. Nous pensons donc que le moteur des déformations n'est pas d'origine tectonique.

11. LIQUEFACTION SOUS L'EFFET DE LA HOULE

11.1. Matériau: sables et limons saturés

11.2. Milieu: lac, mer

11.3. Etat déformé: - ball-and-pillow, pocket
- irregular contortion
- dish, pillar, diapir
- glissements, slump

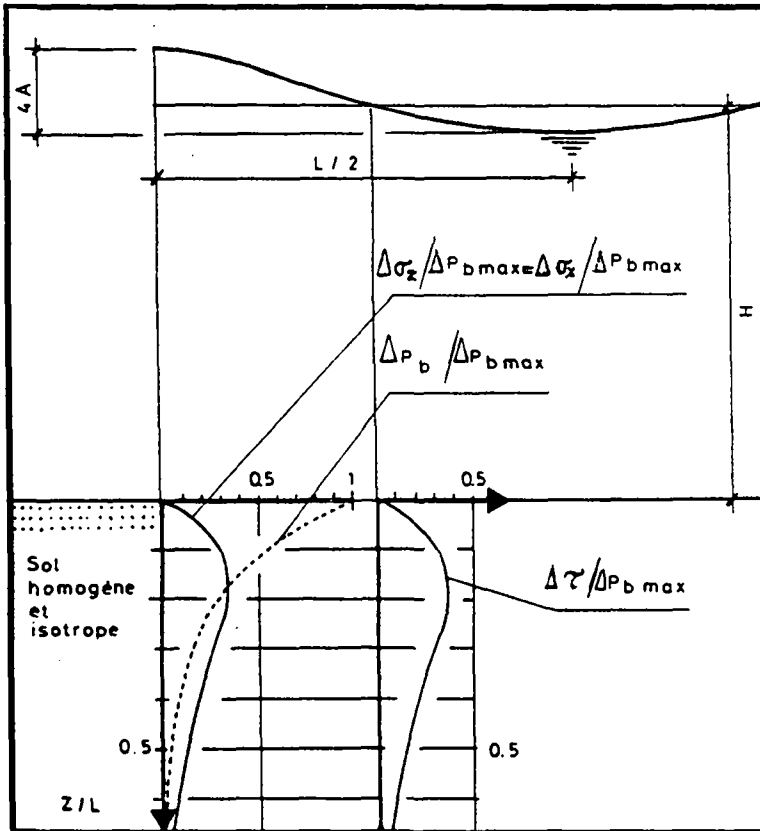
11.4. Description:

La houle induit une variation de pression hydrostatique. Elle est sensible dans les sédiments si la profondeur de l'eau correspond à moins de la moitié de la longueur d'onde de la vague.

Cette pression se transmet au sol sous forme d'efforts normaux et tranchants cycliques (fig. 44 p. 95). Leurs effets sont tout à fait comparables à ceux des séismes. En cas de faibles sollicitations, les mouvements cycliques induisent un tassement et un accroissement de la résistance du sol.

Lors des tempêtes, l'augmentation de pression interstitielle ne peut plus se résorber entre deux vagues. Le sol peut alors atteindre un état liquéfié conduisant à sa rupture par formation de diapirs et de ball-and-pillows. Ces structures libèrent l'excès de pression interstitielle.

Deux approches simplifiées sont décrites à l'annexe 7.3.



- Légende:
- 4A : amplitude de la houle
 - L : longueur d'onde de la houle
 - H : profondeur de l'eau au repos
 - $\Delta\sigma_z$: contrainte totale due à la houle
 - $\Delta p_{b_{max}}$: augmentation maximale de la pression de la houle sur le fond de l'eau
 - Δp_b : pression hydrostatique due à la houle
 - $\Delta\tau$: cisaillement dû à la houle
 - z : profondeur dans le sol

Figure 44 : Répartition des contraintes dues à la houle dans le sol
(d'après MADSEN 1978)

La configuration particulière du delta de Granges dans le lac pro-glaciaire de la Broye permet à la houle d'atteindre une amplitude de l'ordre de 90 cm sous l'effet de la bise. Cette amplitude passe à env. 110 cm lors du déferlement des vagues. D'après les calculs de l'annexe 7.3, ces variations du plan d'eau liquéfient les sédiments sur plus d'un mètre de profondeur. Les forces de percolation deviennent très importantes dans les limons peu perméables, elles induisent alors de grandes déformations par des pillars. On obtient ainsi le scénario suivant (fig. 45).

Nous ne connaissons pas d'exemple où les déformations dues à la houle atteignent la taille de celles de Granges.

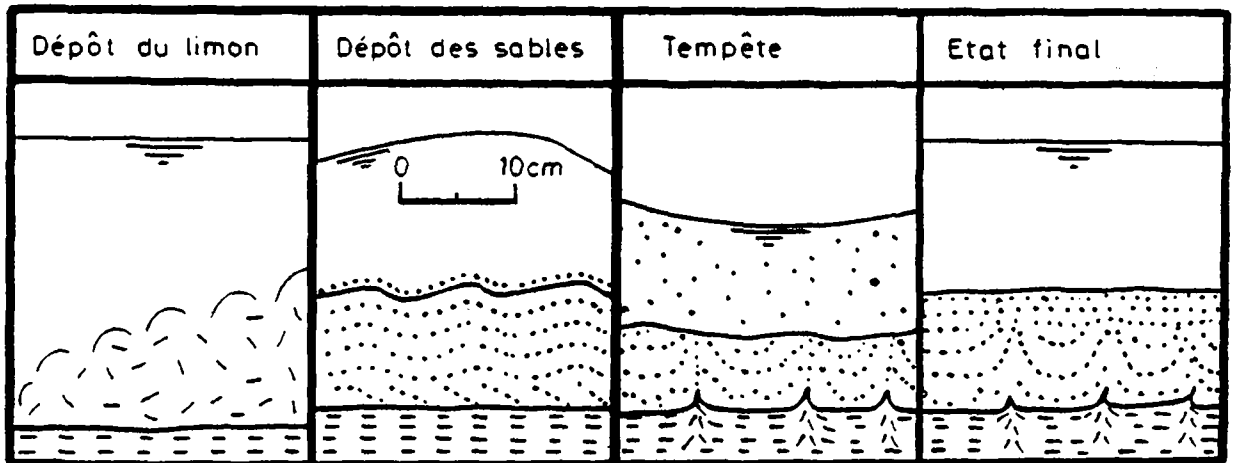


Fig. 45 : Tempête sur le lac de la Broye

12. LIQUEFACTION SOUS L'EFFET D'UNE CRUE

12.1. Matériau: sable et limon

12.2. Milieu: bord et lit de chenaux (rivière, delta, plate-forme continentale, etc.)

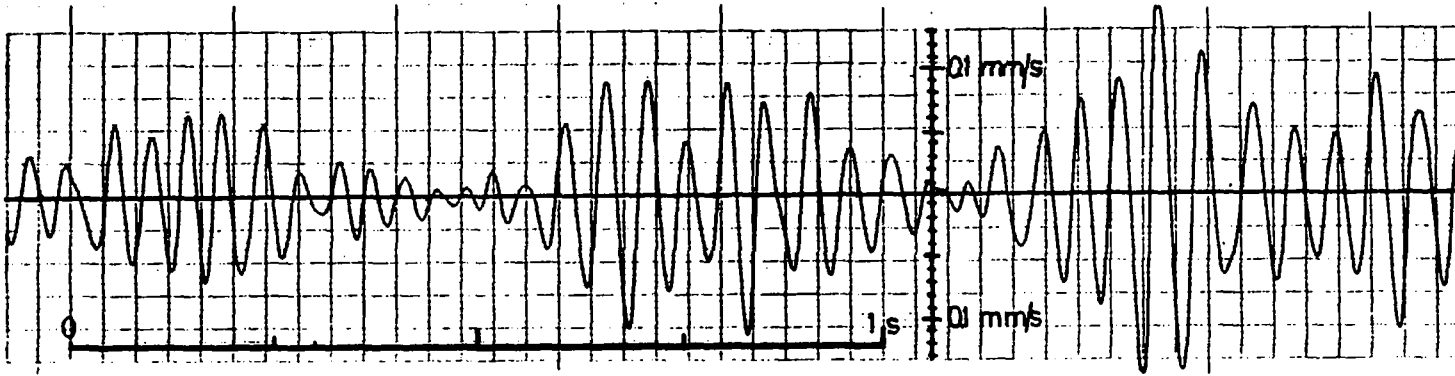
12.3. Etat déformé: - tassement
- pocket, ball-and-pillow
- irregular contortion
- dish, pillar, diapir
- faille, glissement

12.4. Description:

Pendant une crue, le charriage de blocs peut être important. Ce bed load dépend:

- de la nature géologique du bassin versant (existence et taille des blocs),
- des conditions d'écoulement dans le chenal (cisaillement τ_0 élevé, cf. définition, fig. 28 p. 65).

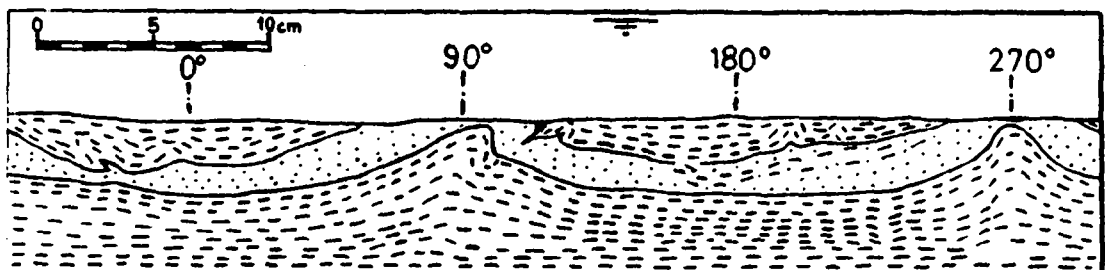
Ces blocs avancent en roulant et en glissant. Ils s'entrechoquent alors en transmettant dans l'eau des ondes de compression. Ces chocs sont d'ailleurs très bien perçus par un observateur situé sur la rive (signal sonore avec/sans vibrations du sol). En pénétrant dans le sol, les ondes induisent des contraintes de cisaillement qui équilibrent celles de compression et de traction. Les signaux sont tout à fait comparables à ceux d'un séisme (fig. 46 p. 98).



Composante horizontale perpendiculaire à l'Aubonne
Situation du point de mesure: Chanivaz (520.018/146.415) (16h00)

Fig. 46 : Vitesse du sol lors de la crue du 20.12.1982 de l'Aubonne (VD)

L'intensité mesurée pendant la crue de l'Aubonne est très faible (0,02 g, voir annexe 6), car la rivière est bien domestiquée par des seuils comme la plupart des rivières en Suisse. Nos tentatives de capter des signaux plus violents sur l'Illgraben près de Susten (VS), l'Aboyen près de Collonges (VS) et la Baye de Clarens près de Blonay (VD) n'ont pas réussi, les événements spectaculaires étant trop courts. Nous nous en tenons à une appréciation qualitative sur un torrent du Cachemire pakistanais où le charriage des blocs donnait lieu à des vibrations sensibles sur les rives, soit pour une fréquence admise de 10 Hz, une accélération horizontale de l'ordre de 0,1 g. Les limons de Granges ont été alors soumis à ces données sur la table vibrante du Département de Mécanique de l'EPFL (annexe 7). La liquéfaction des limons est bel et bien intervenue, mais seulement si une couche de sable charge les limons et au bout de plusieurs minutes de sollicitations. Les diapirs et ball-and-pillows ont ainsi été recréés en laboratoire avec les sédiments des top-sets de Granges (fig.47). Il est donc très probable que le moteur des déformations de Granges soit donné par le passage de crues ou de débâcles sur le delta.



cuve de 15 cm de diamètre

Fig. 47 : Sables et limons de Granges soumis à une accélération horizontale de 0,4 g (liquéfaction immédiate). Ball-and-pillow obtenu sur la table vibrante de l'EPFL (DME)

5. CONCLUSION

De ce long périple, nous pouvons tirer plusieurs remarques sur la sédimentologie et les mécaniques de déformations des dépôts deltaïques.

D'abord, nous rejoignons pleinement Kuenen 1958 p. 25 écrivant que les méthodes de laboratoire "se fanent à l'intérieur" (wither indoors) pour insister sur le travail de terrain. En fait, la vraie clé des dépôts sédimentaires se trouve dans l'analyse des faciès et structures sédimentaires. Les méthodes complémentaires de laboratoire servent surtout à affiner l'approche des faciès, une fois que le cadre général de la sédimentologie d'un bassin versant est connu.

Nous avons constaté que les courbes granulométriques ne peuvent pas être traitées par les statistiques comme des populations homogènes de grains. En effet, le dépôt de sédiments traduit un excès de grains entraînés par l'eau. Du point de vue statistique, la situation n'est pas normale, elle est extrême. Il est donc illusoire de situer l'événement de la moyenne ou de la médiane car cet événement a toutes les chances de ne pas laisser de dépôt. De plus, faire des statistiques sur des poids et non sur des nombres purs de grains prête de toute manière le flanc à la critique puisque la densité et la forme des grains varient avec leur taille.

Nous avons défini une nomenclature de termes décrivant les déformations pénécontemporaines qui ne comportent aucune connotation génétique en retenant les termes déjà utilisés par les sédimentologues. Cette nomenclature est ainsi bien plus simple que l'usage ne pouvait le laisser supposer.

On constate que les déformations contemporaines ne suffisent pas seules à l'identification d'un milieu sédimentaire. Par exemple les dishes, pillars et diapirs sont communs à presque tous les environnements. En fait, le dénominateur commun à toutes ces déformations réside dans la présence de **limons**.

L'analyse des mécanismes de déformations souligne le rôle majeur joué par les limons, en particulier pour la liquéfaction sous l'effet d'un séisme, de la houle, de crues et la cryoturbation.

Dans le cas de Granges-près-Marnand, le moteur des déformations est donné par les limons et non par les sables, ces derniers présentant une capacité de résorption de la pression interstitielle bien supérieure à celle du limon. Ainsi le paramètre de résistance d'un sol non cohérent, dans l'étude des déformations contemporaines, devient la perméabilité et non plus l'angle de frottement interne.

A Granges-près-Marnand, nous avons retenu finalement le mécanisme de liquéfaction sous l'effet d'une crue pour les raisons suivantes:

- Granges ne se situe pas dans une zone fortement secouée par les tremblements de terre. La Vallée de la Broye est loin des Alpes et du Graben rhénan.
- Les tempêtes ont plutôt un effet de remise en suspension des sédiments, sur la beine peu profonde du delta. La houle est freinée et diffractée à cette faible profondeur. L'intensité des déformations devrait donc être décroissante en s'approchant du rivage, ce que nous n'avons pu observer à Granges. D'autre part, les déformations se situeraient à environ un mètre de profondeur sous le fond du lac, soit dans une zone où le cisaillement maximum n'est pas encore atteint. Nous ne connaissons malheureusement pas d'essais en laboratoire qui cherchent à vérifier les développements mathématiques de Madsen 1978. Il y a effectivement là un axe de recherche intéressant les hydrauliciens et les géotechniciens.
- Le passage de crues est attesté par des chenaux graveleux qui entaillent les top-sets sableux à Granges.

Nous avons ainsi une meilleure image des conditions climatiques qui régnaient sur le Plateau suisse lors de la déglaciation du Würm. Le pays était parsemé de lacs au front des langues glaciaires dans

lesquels se jetaient de tumultueux torrents aux débâcles dévastatrices.

LISTE DES ANNEXES

| | page |
|--|------|
| 1. Coupes géologiques dans la Vallée de la Lembe | 104 |
| 2. Interprétation sédimentologique des courbes granulométriques | 109 |
| 3. Equations mathématiques des courbes granulométriques | 135 |
| 4. Inventaire des termes décrivant les déformations pénécontemporaines des sédiments | 143 |
| 5. Delta de Granges : Dossier photographique | 149 |
| 6. Essais en laboratoire sur les sédiments de Granges | 157 |
| 7. Mécanismes de déformations | 193 |
| 8. Inventaire des types de déformations observées dans la nature et de leur genèse | 229 |
| 9. Inventaire des expérimentations géologiques | 243 |

Annexe 1

Coupes géologiques dans la Vallée de la Lembe

Coupe de la chambre de captage

Coordonnées : 550 975 / 177 115

SW

NE

(msm) Altitude

695 —

Prof. (m)

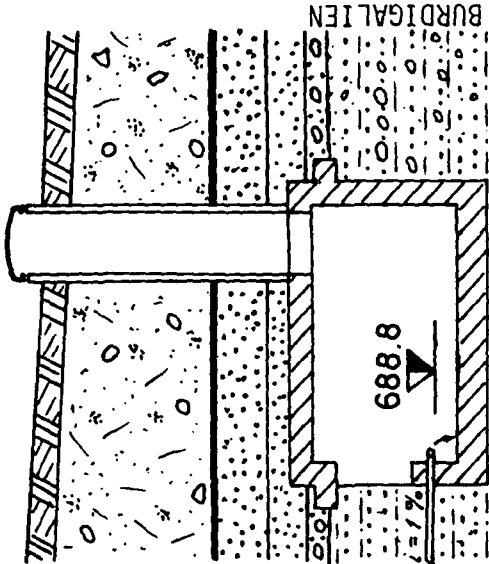
—

—

—

—

690



— 0.0 — terre végétale sablo.limoneuse

— 0.4 —

— moraine sableuse peu limoneuse compacte beige à blocs épars

— 2.3 — grès moyen à fin avec niveau de charbon et d'oxydation

— 3.0 — (couleur rouille) à 3.0 m., complètement décalcifié jusqu'à 3.0 m.

— 3.5 — grès moyen à graviers roulés épars, à laminations entrecroisées

— 3.9 — et niveaux noirs et rouille décalcifiés.

— 5.9 — grès moyen légèrement décalcifié, à graviers et blocs

roulés épars Ø max = 8 cm. et grès fin peu décalcifié,

à interstrates centimétriques de grès fin marneux, tous

les 30 à 60 cm.

ANNEXE I

GEOLEP

Zone de protection :

Commune de **GRANGES-près-MARNAND****L'Oche**Entreprise:

Clot.Frères.

Engin:

Liebherr 901

Date:

1-2.1282.

Coordonnées: 555.760/178.875/557

ESSAI D'INFILTRATION N°C 7

Largeur: 0.85 m.

Longueur: 1.90 m.

Hauteur: 3.33 m.

(m) 1:50

V= 500 l. d'eau

0.00

0.30

1.70

2.25

3.25

Terre végétale sablo-limoneuse.

Moraine limono-sableuse, peu graveleuse, à rares blocs, terreuse, (racines), assez compacte, brune.

Sable fin, limoneux, beige à laminations millimétriques et rares graviers.

Sable moyen, graveleux, à blocs.

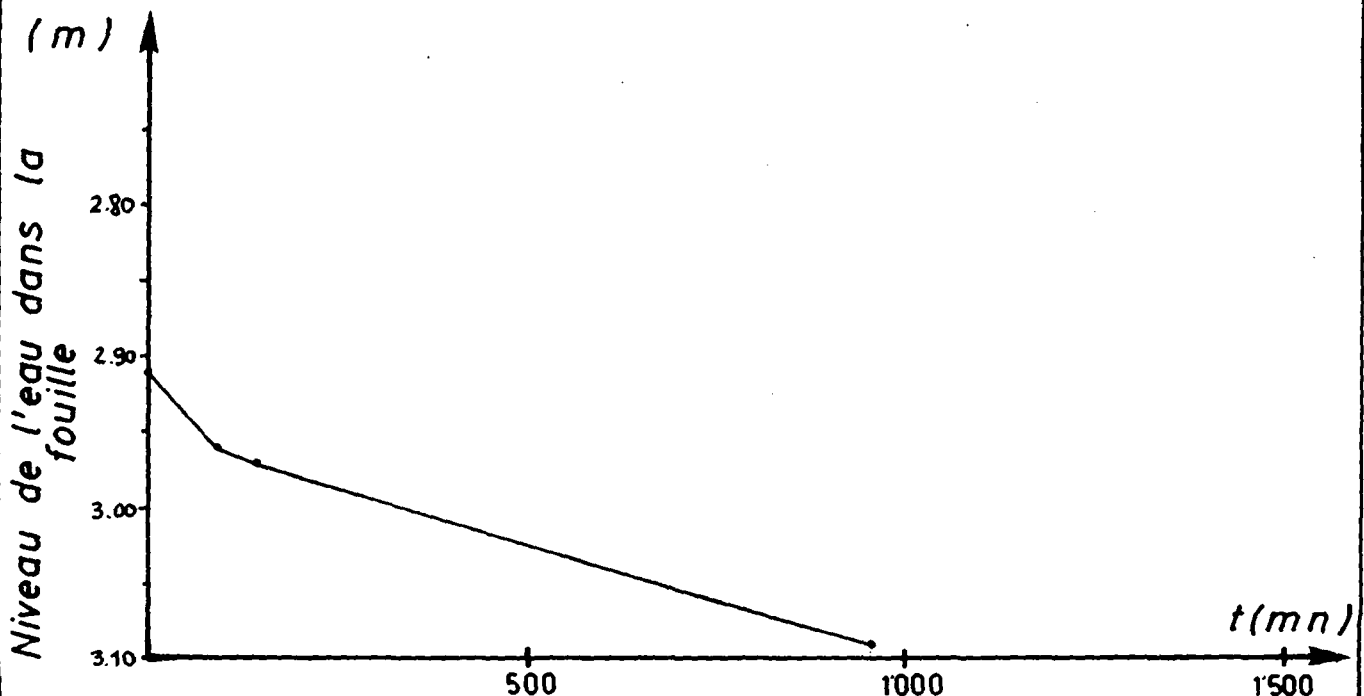
fluvio-
glaciaire

Pas de suintement.

| JOUR | Heure exacte | Δt (mn) | Hauteur à la latte | Δh (cm) | Observation sur la stabilité | K Porchet (m/s) |
|------|--------------|-----------------|--------------------|-----------------|------------------------------|----------------------|
| 1 | 15.45 | 0 | 2.91 | 0 | EO | |
| | 17.15 | 90 | 2.96 | 5 | " | $3.95 \cdot 10^{-6}$ |
| | 18.07 | 142 | 2.97 | 6 | " | $1.43 \cdot 10^{-6}$ |
| 2 | 7.40 | 955 | 3.09 | 18 | " | $1.22 \cdot 10^{-6}$ |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Remarques:

EO: Pas d'écroulement

 $\bar{K} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ 

GEOLEP

Zone de protection :

Commune de **GRANGES-près-MARNAND** L'Oche

Entreprise:

Clot.Frères.

Engin:

Liebherr 901

Date:

1-2.12.82.

Coordonnées: 555.600/178.695/555

ESSAI D'INFILTRATION N° C9

Largeur: 0.85 m. Longueur: 1.80 m. Hauteur: 3.30 m.

(m) 1:50

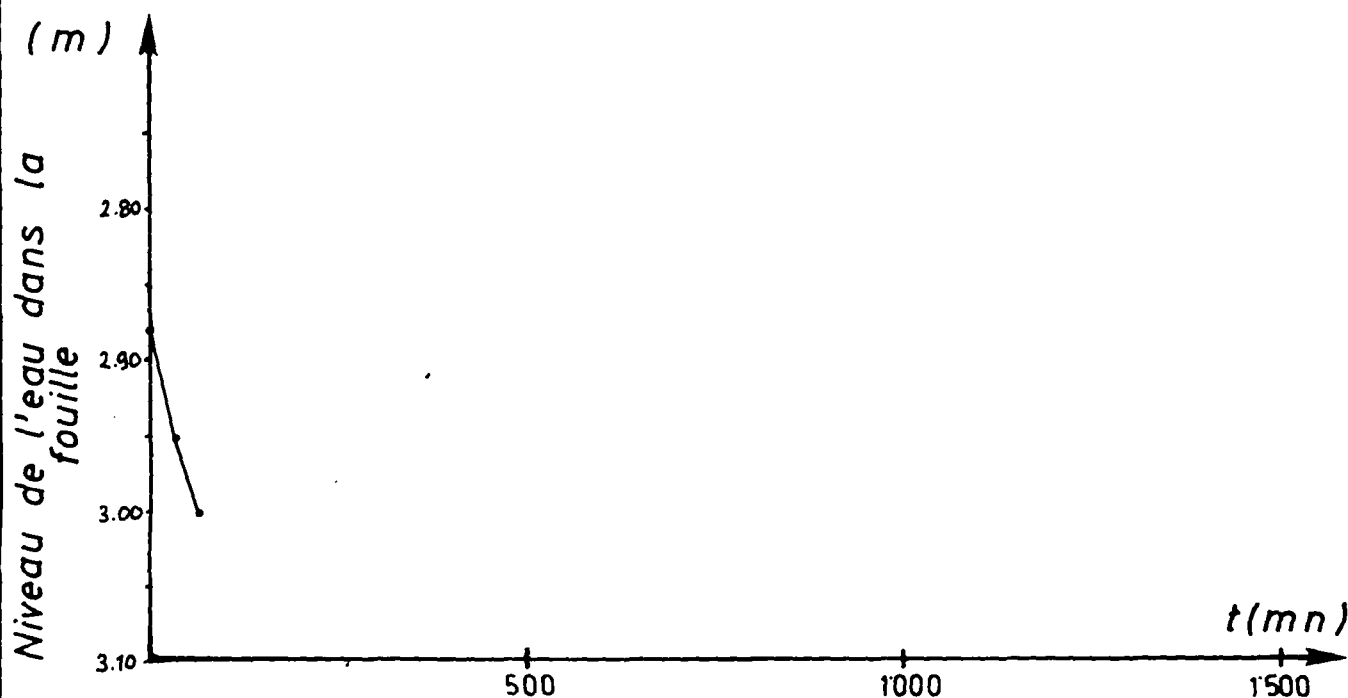
V = 500 l. d'eau

| | | |
|------|--|--|
| 0.00 | | Terre végétale sablo-limoneuse. |
| 0.20 | | Colluvion sableuse peu limoneuse, peu graveleuse, brune, peu compacte. |
| 0.60 | | Sable moyen, propre, très peu graveleux, gris, terreux, brun. |
| 1.00 | | Sable moyen propre, très peu graveleux, gris. |
| 1.40 | | Gravier sableux, gris, propre. |
| 1.60 | | Sable moyen, très peu graveleux, gris, à laminations centimétriques. |
| 2.30 | | Limon sableux beige, à laminations millimétriques. |
| 2.40 | | Gravier sableux à blocs abondants, roulés, cristallins et calcaires |
| 2.90 | | Ø max. = 40 cm., gris. |
| | | Fluvio-glaciaire |
| | | Pas de suintement. |

| JOUR | Heure exacte | Δ t (mn) | Hauteur à la latte | Δ h (cm) | Observation sur la stabilité | K Porchet (m/s) |
|------|--------------|----------|--------------------|----------|------------------------------|----------------------|
| 1 | 16.50 | 0 | 2.88 | 0 | EO | |
| | 17.25 | 35 | 2.95 | 7 | " | $1.43 \cdot 10^{-5}$ |
| | 17.58 | 68 | 3.00 | 12 | " | $1.19 \cdot 10^{-5}$ |
| 2 | 8.16 | 926 | sec | 42 | " | — |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Remarques :

EO : Pas d'écroulement

 $\bar{K} = 10^{-5} \text{ m/s}$ 

GEOLEP

Zone de protection :

Commune de **GRANGES-près-MARNAND****Nervaux**Entreprise:

Clot.Frères.

Engin:

Liebherr 901

Date:

1-2.12.82.

Coordonnées: 554.545/179.305/650

ESSAI D'INFILTRATION N° 2

Largeur: 0.85 m.

Longueur: 2.50 m.

Hauteur: 3.28 m.

(m) 1:50

0.00

0.30

1.15

V= 560 l. d' eau+2kg. fluorescéine
(Uranine)

Terre végétale, sableuse, peu limoneuse.

Moraine sableuse, peu limoneuse, très peu graveleuse, beige, un peu
terreuse, peu compacte.Moraine sableuse et graveleuse, peu limoneuse, peu argileuse, grise,
peu compacte.

Pas de suintement.

| JOUR | Heure exacte | Δt (mn) | Hauteur à à la latte | Δh (cm) | Observation sur la stabilité | K Porchet (m/s) |
|------|-----------------|--------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|
| 1 | 9.46 | 0 | 2.75 | 0 | E.O. | |
| | 10.45 | 59 | 2.77 | 2 | " | 2.14 10 |
| | 13.14 | 208 | 2.81 | 6 | " | 1.76 10 |
| | 17.40 | 474 | 2.88 | 13 | " | 1.85 10 |
| 2 | 8.35 | 137 | 3.02 | 27 | " | 1.28 10 |

Remarques:EO: Pas
d'écroulement $\bar{K} = 2 \cdot 10^{-6}$ m/s

Annexe 2

Interprétation sédimentologique des courbes granulométriques

- I Approche Doeglas 1946
- II Approche Kittleman 1964
- III Approche Rivière 1977
- IV Approche Visher 1969

Tableau 17: Représentation graphique des mesures sur la taille des grains

A. Diagramme rectangulaire

| ABSCISSE | | | ORDONNEE | | | |
|--------------------------------------|-------|------------------|---|------|--|------------------------|
| grandeur | unité | échelle | grandeur | mode | échelle | EXEMPLES |
| d | mm | lg ₁₀ | pourcentage | H.C. | arithm. | SNV 670810a |
| $\phi = -\lg_2 \frac{d}{d_0}$ | - | arithm. | pondéral | H.C. | arithm. | KRUMBEIN 1934 |
| lg ₁₀ d _{Stokes} | - | arithm. | p. tronqué | C | arithm. | RIVIERE 1977 |
| d | mm | lg ₁₀ | pourcentage | C | Gauss | OTTO 1939 |
| $\phi = -\lg_2 \frac{d}{d_0}$ | - | arithm. | | C | Gauss | OTTO 1939 |
| d | µm | arithm. | pondéral | C | Gauss | DOEGLAS 1946 |
| $\psi = \lg_2 \frac{d}{d_0}$ | - | arithm. | | C | Gauss | REED e.a.1975 |
| d | mm | lg ₁₀ | | C | Rosin $\ln \frac{\ln}{100} \cdot P$ | KITTLEMAN 1964 |
| $\phi = -\lg_2 \frac{d}{d_0}$ | - | arithm. | | H | lg ₁₀ P | ALLEN 1968 |
| $x = \ln \frac{d}{d_0}$ | - | arithm. | $P = \frac{\pi}{\ln d_i - \ln d_{i+1}}$ | H | ln P | BARNDORFF-NIELSEN 1982 |

B. Diagramme polaire

| COORDONNEE ϕ | | | COORDONNEE p | | | |
|-------------------|-------|-------------|----------------------|------|--------------|--------------|
| grandeur | unité | échelle | grandeur | mode | échelle | EXEMPLES |
| d | µm | non arithm. | pourcentage pondéral | H | arithmétique | RIVIERE 1952 |

Légende: d = diamètre équivalent des grains (obtenu par mesure indirecte)
d₀ = 1 mm

$$d_{\text{Stokes}} = \frac{18 \nu_s \cdot \mu^{1/2}}{(\rho_s - \rho_f) g}$$

ν₀ = 1 cm/s

H = histogramme des fréquences

C = fréquences cumulées

p = pourcentage pondéral

$$\text{Gauss: } 50 - p_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{y_1} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy$$

où a = facteur d'échelle de l'ordonnée

$$\text{Rosin: } y = a \ln \ln \frac{100}{p}$$

Tableau 18 : Description des échantillons et liste des essais effectués

A. Aquitaniens

1. Grès

Identification: A1

Coordonnées du lieu de prélèvement: 556.950/179.450/502

Situation: rive gauche de la Lembe, en amont du moulin de Granges

Essais pratiqués: - minéralogie déterminée par analyse chimique
- exoscopie des quartz

2. Grès

Identification: A2

A2: échantillon obtenu après décalcification du grès A1 à l'acide chlorhydrique

3. Grès

Identification: A3

Coordonnées du lieu de prélèvement: 556.870/179.360/520

Situation: rive droite de la Lembe, en amont du moulin de Granges

Essais pratiqués: - minéralogie déterminée par analyse chimique
- exoscopie des quartz

4. Marne

Identification: A4

Coordonnées du lieu de prélèvement: 556.070/179.250/508

Situation: lit de la Lembe, à l'aval de Coumin-Dessous

Essai pratiqué: limites d'Atterberg: - limite de liquidité : 45,3%
- indice de plasticité: 21,1%

5. Galet mou marneux

Identification: A5

Coordonnées du lieu de prélèvement: 557.577/178.830/500.05

Situation: top-set sableux du delta de Granges (voir coupe 1, fig. 6)

Essais pratiqués: - minéralogie déterminée aux rayons X
- limites d'Atterberg

B. Moraine de fond

1. Moraine de fond de Coumin

Identificateur: MC

Coordonnées du lieu de prélèvement: 555.330/178.740/525

Situation: bord de la Lembe, en amont de Coumin-Dessous

Essais pratiqués: - minéralogie déterminée par analyse chimique et
rayons X

- exoscopie des quartz

- morphométrie des galets

2. Galet mou de moraine

Identificateur: MG

Coordonnées du lieu de prélèvement: 557.630/178.870/492

Situation: galet mou dans les fore-sets du delta de Granges

Essais pratiqués: limites d'Atterberg: - limite de liquidité : 16,0%

- indice de plasticité: 5,2%

C. Top-set deltaïque de Granges

1. Limons

Identificateurs: L1, L3, L6, L13, L14, L22, LS (= limon standard)

Coordonnées des lieux de prélèvement:

- L1 à L14: 557.495/178.864/500,0-500,2

- L22, LS : 557.572/178.832/498,95

Situation: voir coupes fig. 6 p. 14

Essais pratiqués: L1 : minéralogie déterminée aux rayons X

L22 : minéralogie déterminée par analyse chimique

LS : limites d'Atterbert, perméamètre, oedomètre,
cellule triaxiale

2. Sables

Identificateurs: S5, S9, S21, S23, S24, S25, S26, S27, SS (= sable standard)

Coordonnées des lieux de prélèvement:

- SS, S5, S9: 557.495/178.864/500,3

- S21 à S27 : 557.572/178.832/498,90-499,30

Situation: voir coupes fig. 6 p. 14

Essais pratiqués: S5, S9 : minéralogie déterminée au microscope
polarisant

S1, S5, S9: exoscopie des quartz

SS : minéralogie déterminée aux rayons X
et par analyse chimique, perméamètre,
oedomètre, cellule triaxiale.

D. Fore-set deltaïque de Granges

Identificateur: F1, F2

Coordonnées des lieux de prélèvement: F1: 557.630/178.870/487,5

F2: 557.630/178.870/493

Situation: voir coupes fig. 6 p. 14

Essais pratiqués: F1 : minéralogie déterminée par analyse chimique
et exoscopie des quartz

F1, F2 : morphométrie des galets

Tableau 19: Pourcentages pondéraux des échantillons analysés par tamisage (Lembe)

| diamètres équivalents: d = d passoire = 1,25 • maille du tamis en mm | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| Echant. | Poids éch. sec (g) | 0,08 | 0,1 | 0,125 | 0,150 | 0,20 | 0,25 | 0,312 | 0,394 | 0,5 | 0,625 | 0,79 | 1,25 | 2,0 | 5,0 | 12,5 | 25 | d max |
| A1 | 257,7 | 9,9 | | 12,89 | | 23,11 | 31,75 | 42,46 | | 81,32 | 92,23 | | | | | | | 1 |
| A2 | 190,5 | | | 14,95 | | 27,92 | 40,00 | 55,00 | | 91,39 | 99,12 | | | | | | | 1 |
| A3 | 800,3 | 9,03 | 12,18 | | | 26,36 | | 52,05 | 70,45 | 82,64 | 93,51 | 98,40 | 99,92 | | | | | 3 |
| MC(matrice) | 1316,6 | | | 71,55 | | 83,26 | 87,33 | 91,71 | 94,60 | 96,59 | 97,46 | | 98,11 | 98,32 | | | | 5 |
| MG | 1138,1 | | | 40,55 | | | | 60,03 | | | 80,62 | | | 85,82 | 89,19 | 94,58 | | 24 |
| L1 | | | (95) | 99,32 | | | 99,98 | | | | | | | | | | | 0,315 |
| S 5 | 242,0 | 4,88 | 9,21 | 16,61 | | 46,38 | 61,92 | | 94,79 | 98,29 | 99,13 | | | | | | | 1 |
| S 9 | 225,4 | 3,73 | 9,29 | 18,19 | | 44,83 | 66,83 | | 94,24 | 97,46 | | | | | | | | 2 |
| S21 | 275,6 | | | 85,97 | | 95,0 | 96,70 | 98,31 | 99,29 | 99,70 | | | | | | | | 0,5 |
| S23 | 191,6 | | | 48,77 | | 87,82 | 96,07 | 99,44 | 99,90 | | | | | | | | | 0,5 |
| S24 | 116,1 | | | 90,37 | | 99,44 | 99,85 | | | | | | | | | | | 0,5 |
| S25 | 298,3 | | | 25,97 | | 58,22 | 81,59 | 93,32 | 99,09 | | | | | | | | | 0,6 |
| S26 | 196,1 | | | 33,90 | | 80,53 | 92,61 | 97,71 | 99,44 | | | | | | | | | 0,5 |
| S27 | 173,4 | | | 81,29 | | 96,51 | 98,56 | 99,65 | | | | | | | | | | 0,5 |
| F1 | 526,6 | | 2,37 | 3,80 | 5,16 | 9,72 | 18,33 | 33,39 | 59,20 | 76,71 | 91,60 | 97,93 | 99,73 | | | | | 4 |
| F2 | 3557,5 | | | 2,32 | | | | | | 8,61 | | | | 22,09 | 43,37 | 71,67 | 88,20 | 44 |
| sable standard | 161,4 | 2 | 6,32 | 13,36 | 20,32 | 42,51 | 66,73 | 84,38 | 96,20 | 98,81 | 99,80 | | | | | | | 0,8 |

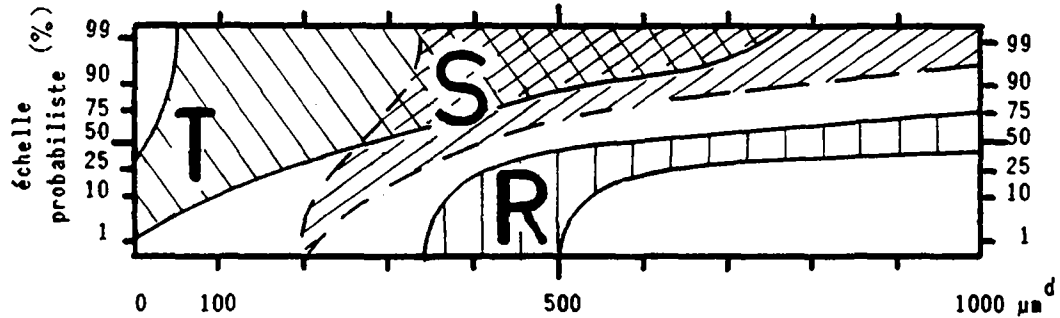
I. APPROCHE DOEGLAS 1946

Déductions sur la capacité du transport fluviatile

A. Procédure

Courbes établies par tamisage (et aréomètre)

Domaine d'application: 2 - 1000 μm (limon et sable)



Légende: Type T: courbure concave $d_{1\%} < 2 \mu\text{m}$
 Type S: 2 courbes (concave + convexe) $d_{1\%} \approx 200 \mu\text{m}$
 Type R: courbure convexe $d_{1\%} \approx 350 - 500 \mu\text{m}$

Fig. 52: Classification des courbes selon 3 types principaux

B. Tableau 20: Interprétation sédimentologique, Doeglas 1946, p. 33

| Type Differentiation | Origin | Occurrence |
|--------------------------------|---|---|
| | | Homogeneous deposits or thin layers. |
| R | Continuous current. Stream bed of rivers, strong marine currents, and surf action, eluvial material, erosion. | Pebbles, gravel and coarse sands, re-worked older deposits (eluvium) or deposits due to sudden decrease in capacity (velocity). |
| S | Down-stream decreasing capacity; good sorting action. | Lee side of dunes, banks, shallows and ripples, protected places. |
| T | Stagnant water, deposition of entire suspension. | Lakes, bays, inland seas, quiet places on tidal flats, natural levees and deep-sea. |
| Mixing | | Stratified deposits and heterogeneous deposits. |
| R+S | Running water with varying velocities. | Stream bed of rivers, strong marine currents and wave action near beaches, shallows and cliffs. |
| S+T | Running water, velocity varies from zero to moderate. | Coastal deposits, sands on tidal flats, inland seas, estuaries. |
| do. with small amount of T | | Nearly all sands have a small percentage of T-material. |
| R+S+T | Running water with strongly fluctuating velocities. Current now and then ceases. | (River suspensions), fluvial clays, till, eluvial material, debris on fans and talis, mudflows. |
| R+S+T with large contents of T | Running water with varying velocities, of which one predominates. | In many sands. |

III. APPROCHE A. RIVIERE 1977

Equation mathématique de la courbe granulométrique à l'aide de trois paramètres

Domaine d'application: 0,06 μm - 5 mm

A. Procédure

1) Calcul des dimensions équivalentes des grains en fonction des vitesses limites de chute

a) Pour un diamètre de tamisage donné, on calcule son diamètre nominal $X_n = 1,15 X_v$ (SNV 670 810: $X_n = 1,25 X_v$ que nous avons gardé pour nos calculs), où X_v = dimension du vide de la maille du tamis.

b) On applique à X_n les formules de Berthois-Gendre ou de Gibbs et al. 1971 pour en connaître la vitesse limite de chute V_s .

Nous avons adopté la relation de Gibbs et al. 1971:

$$V_s = \frac{-3\mu + \left\{ 9\mu^2 + gr^2 \rho_f (\rho_s - \rho_f) (0,015476 + 0,19841 \rho) \right\}^{1/2}}{\rho_f (0,011607 + 0,14881 r)}$$

V_s = (cm/s)

μ = viscosité dynamique (poises)

g = accélération due à la gravité (cm/s^2)

r = rayon de la sphère (cm) où $r_{\text{max}} = 0,30$ cm

ρ_f = masse volumique du fluide (g/cm^3)

ρ_s = masse volumique de la sphère (g/cm^3)

c) La dimension équivalente s'obtient en appliquant la formule de Stokes à la vitesse limite de chute calculée précédemment, soit:

$$d_e = \left(\frac{V_s \cdot 18 \cdot \mu}{g (\rho_s - \rho_l)} \right)^{1/2}$$

Rivière exprime d_e en $\frac{\mu\text{m}}{100}$ ou par son \lg_{10} .

2) Réduction des pourcentages

Rivière élimine, pour ne conserver que "les fractions bien définies du domaine granulométrique":

- la fraction inférieure à 0,063 μm
- le centile supérieur

3) Calcul de l'indice d'évolution granulométrique N

Rivière a trouvé que la fonction

$$y = f(X) = 100 \cdot \frac{10^{NXr} - 1}{10^{NG} - 1}$$

exprime avec "une représentativité suffisante" les granulométries réelles. L'exposant N s'obtient par itération à partir de l'équation transcendante implicite:

$$\frac{\bar{X}}{G} = \frac{10^{NG}}{10^{NG} - 1} - \frac{1}{NG \cdot \ln 10}$$

où $\bar{X}r = \bar{X} - 0,8 =$ moyenne réduite

\bar{X} = diamètre moyen réel $\left(\lg_{10} d \left(\frac{\mu\text{m}}{100} \right) \right)$

$G = X_{100} - 0,8$

X_{100} = diamètre correspondant à 100% du pourcentage pondéral

$$0,8 = \lg_{10} \left(6,3 \frac{\mu\text{m}}{100} \right)$$

N = indice d'évolution granulométrique

4) Comparaison de l'indice théorique Nth avec l'indice calculé

Rivière a calculé par régression linéaire un indice théorique Nth en fonction du diamètre moyen \bar{X} .

$$Nth = 0,3248 \bar{X} - 0,82509$$

Si Nréel est très différent de Nth, Rivière parle alors de granulométrie anormale. De toute manière, il est bon de dessiner la courbe granulométrique obtenue par l'équation mathématique pour la comparer avec les résultats expérimentaux.

B. Tabl.21: Interprétation des courbes granulométriques selon Rivière 1977

| Domaine | N | \bar{X} ($\mu\text{m}/100$) | faciès | milieu |
|-----------------------------|-------------------|--|-------------------|---|
| a) Granulométries normales | | | | |
| I | $-0,4 < N < -0,1$ | $\bar{X} < 2,0$ $\bar{d} \leq 1 \mu\text{m}$ | hyperbolique | dépôts de lagunes, de lacs, etc. |
| II | $-0,1 < N < 0,1$ | $2 < \bar{X} < 2,75$ $1 < \bar{d} < 5,6 \mu\text{m}$ | sublogarithmique | dépôts de cours inférieurs, lagunes, turbidités, etc. |
| III | $0,1 < N < 0,7$ | $\bar{X} > 2,75$ $\bar{d} > 5,6 \mu\text{m}$ | parabolique | dépôts fluviatiles, de chenaux, turbidites, etc. |
| b) Granulométries anormales | | | | |
| IV | $0,26 < N < 0,8$ | $3,1 < \bar{X} < 3,6$ $13 < \bar{d} < 40 \mu\text{m}$ | ultra-parabolique | dépôts éoliens fins |
| V | $N > 0,48$ | $\bar{X} > 3,2$ $\bar{d} > 16 \mu\text{m}$ | ultra-parabolique | éluvions, plage |
| VI | $N > 0,48$ | $\bar{X} > 3,8$ $\bar{d} > 63 \mu\text{m}$ | ultra-parabolique | structures sédimentaires fluviatiles (rides, etc.) |

IV. APPROCHE G.S. VISHER 1969

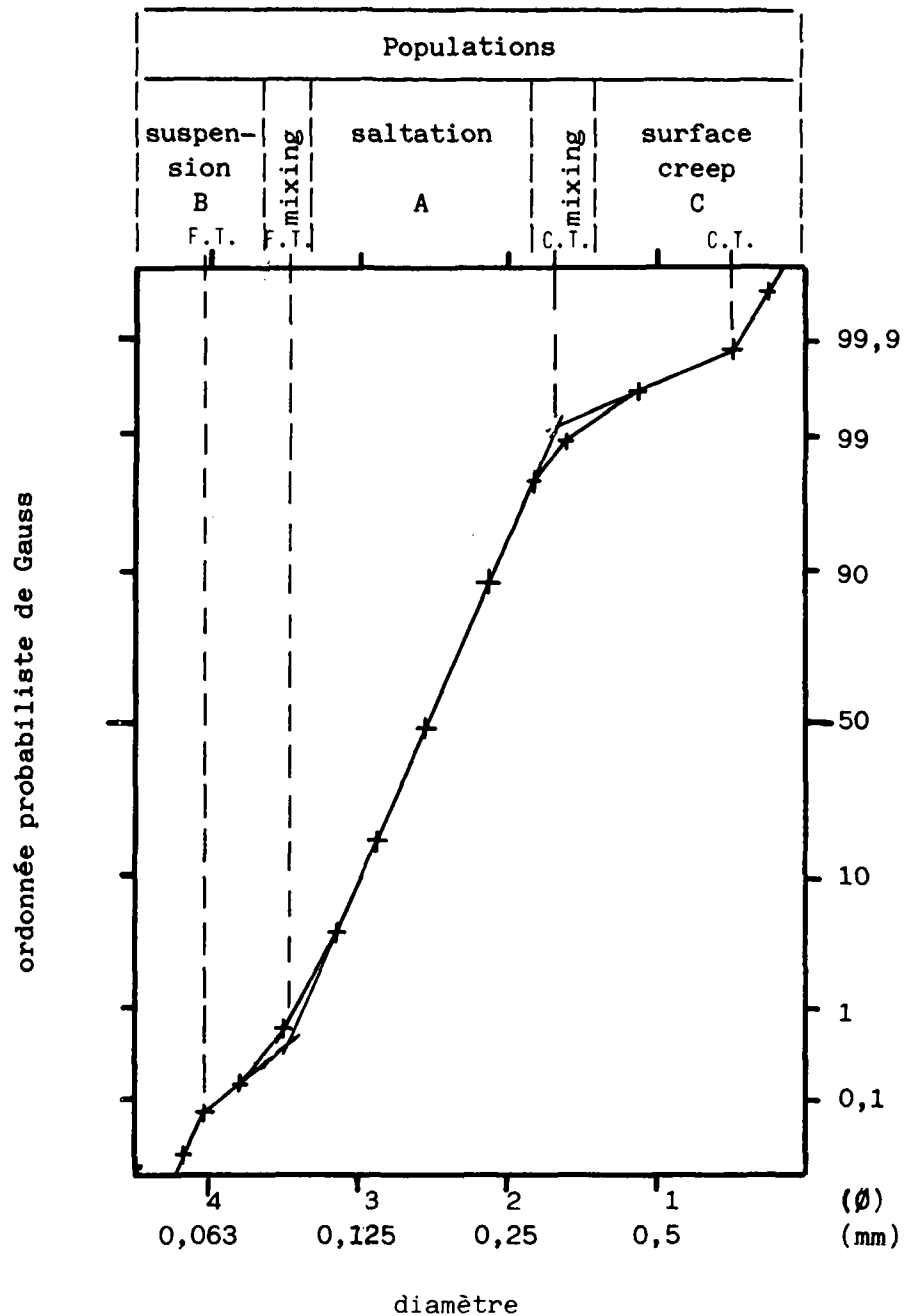
Mise en évidence des types de transport fluviatile

Courbes établies par tamisage

Domaine d'application: 63 μ m - 1 mm (sable)

A. Procédure

Fig. 54 : Définition des populations et des points de troncature d'une courbe granulométrique



Légende: F.T.: Fine Truncation Point
C.T.: Coarse Truncation Point

Tableau 22: Interprétation des courbes granulométriques selon VISHNER 1969

(TABLE 1)—Key: C.T. = Coarse Truncation point; F.T. = Fine Truncation point;

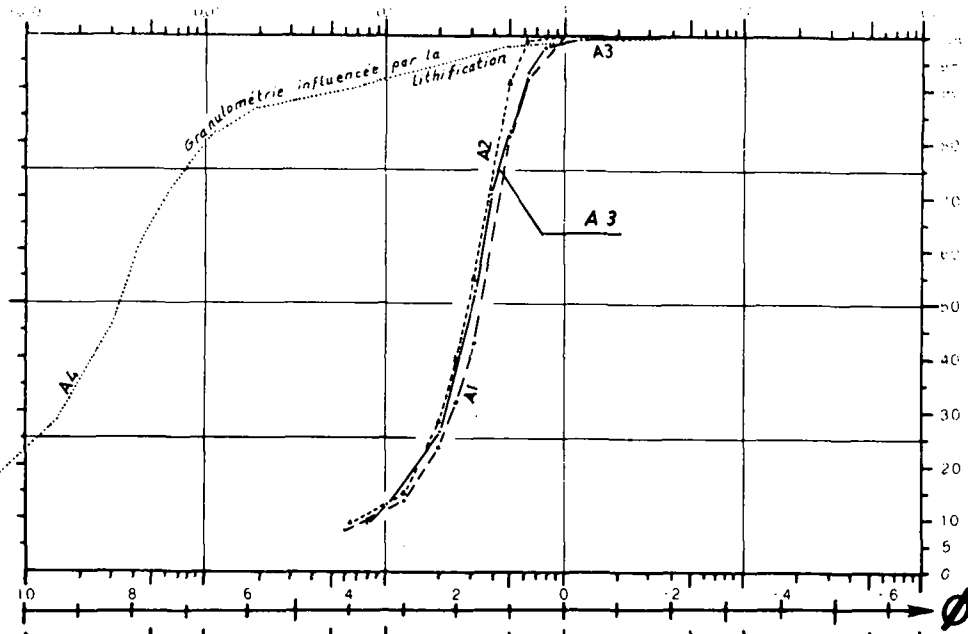
A = Saltation population; B = Suspension population; C = Surface creep population.

| Sand type | Saltation population | | | | Suspension population | | | | Surface creep population | | | |
|-------------------|----------------------|----------------------------|--------------|-----------|-----------------------|-----------|------------|-----------|--------------------------|-----------|-------------------|------------|
| | Percent | Sorting | C.T. Phi. | F.T. Phi. | Percent | Sorting | Mixing A&B | F.T. Phi. | Percent | Sorting | C.T. Phi. | Mixing A&C |
| Fluvial | 65-98 | Fair | -1.5 -1.0 | 2.75-3.50 | 2-35 | Poor | Little | >4.5 | Varies | Poor | No Limit | Little |
| Natural levee | 0-30 | Fair | 2.0-1.0 | 2.0-3.5 | 60-100 | Poor | Much | >4.5 | 0-5 | | | None |
| Tidal channel | 20-80 | Good | 1.5-2.0 | 1.5-3.5 | 0-20 | Poor-Good | Much | 35-4.5 | 0-70 | Fair-Good | -0.5-1.5 | Average |
| Tidal inlet | 30-65 | Good | 1.25-1.75 | 2.0-2.5 | 2-5 | Fair-Good | Average | 3.5-4.0 | 30-70 | Fair-Good | -0.5- No Limit | Average |
| Beach | 50-99 | 2 Populations Excellent | .5-2.0 | 3.0-4.25 | 0-10 | Fair-Good | Little | 3.5-4.5 | 0-50 | Fair | -1.0- No Limit | Average |
| Plunge zone | 20-90 | Good | 1.5-2.5 | 3.0-4.25 | 0-2 | Good | Much | 3.0-4.5 | 10-90 | Fair-Poor | No Limit | Average |
| Shoal area | 30-95 | Good | 2.00-2.75 | 3.5-4.5 | 0-2 | Poor-Fair | Little | 3.5-4.5 | 5-70 | Fair-Poor | 0.0-2.0 | Much |
| Wave zone | 35-90 | Good-Excellent | 2.00-3.00 | 3.0-4.5 | 5-70 | Fair-Poor | Much | 3.75-4.5 | 0-10 | Poor | 0.0- No Limit | Little |
| Dune | 97-99 | Excellent | 1.0-2.0 | 3.0-4.0 | 1-3 | Fair | Average | 4.0-4.5 | 0-2 | Poor | 1.0-0.0 | Little |
| Turbidity current | 0-70 | Fair-Poor | 1.0-2.5 | 0.0-3.5 | 30-100 | Poor | Much | >4.5 | 0-40 | Fair-Poor | No Limit | Much |

COURBES GRANULOMETRIQUES 1 AQUITANIEN

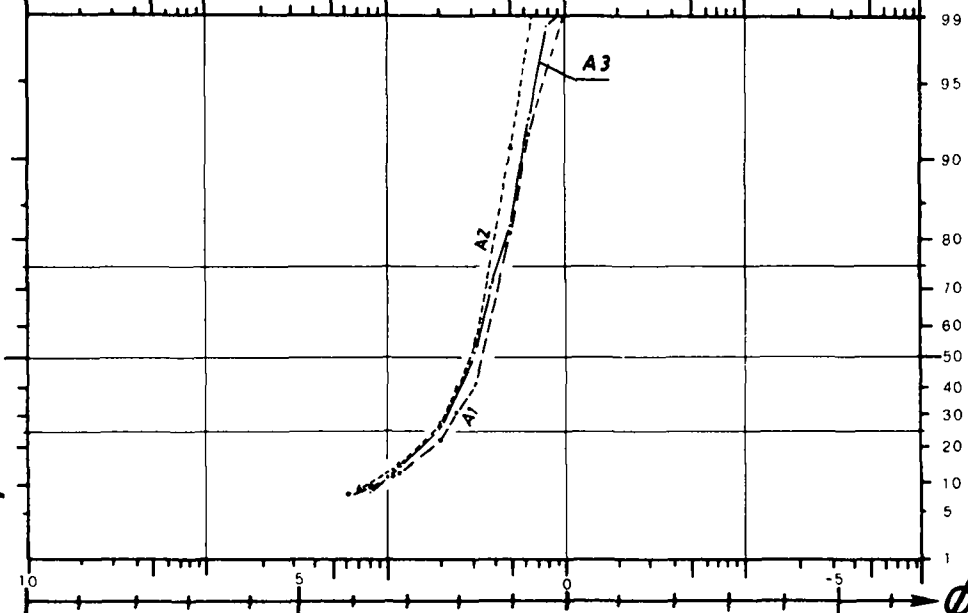
SNV 670810

tamisats



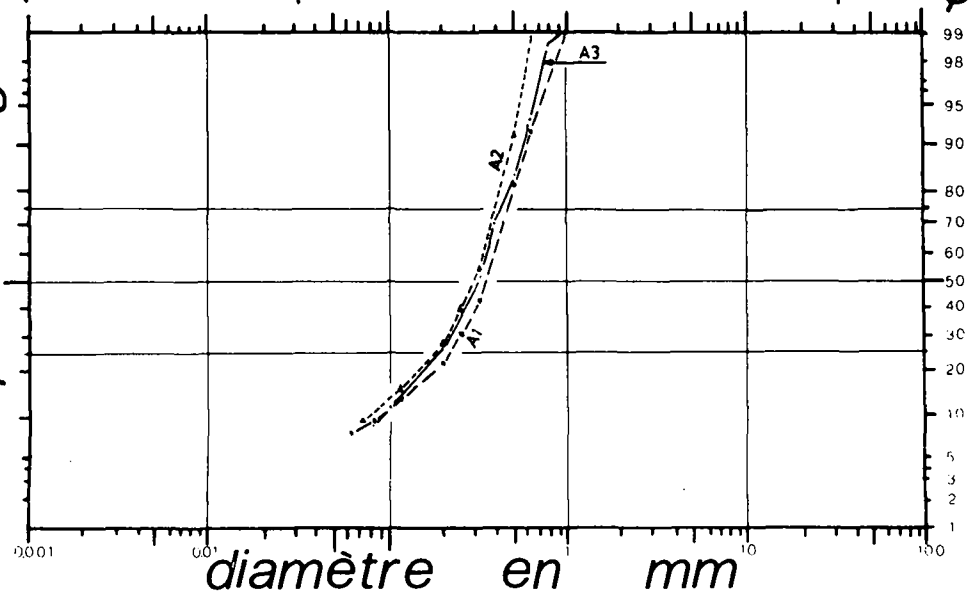
KITTLEMAN 1964

des pondéral



VISHER 1969

pourcentage

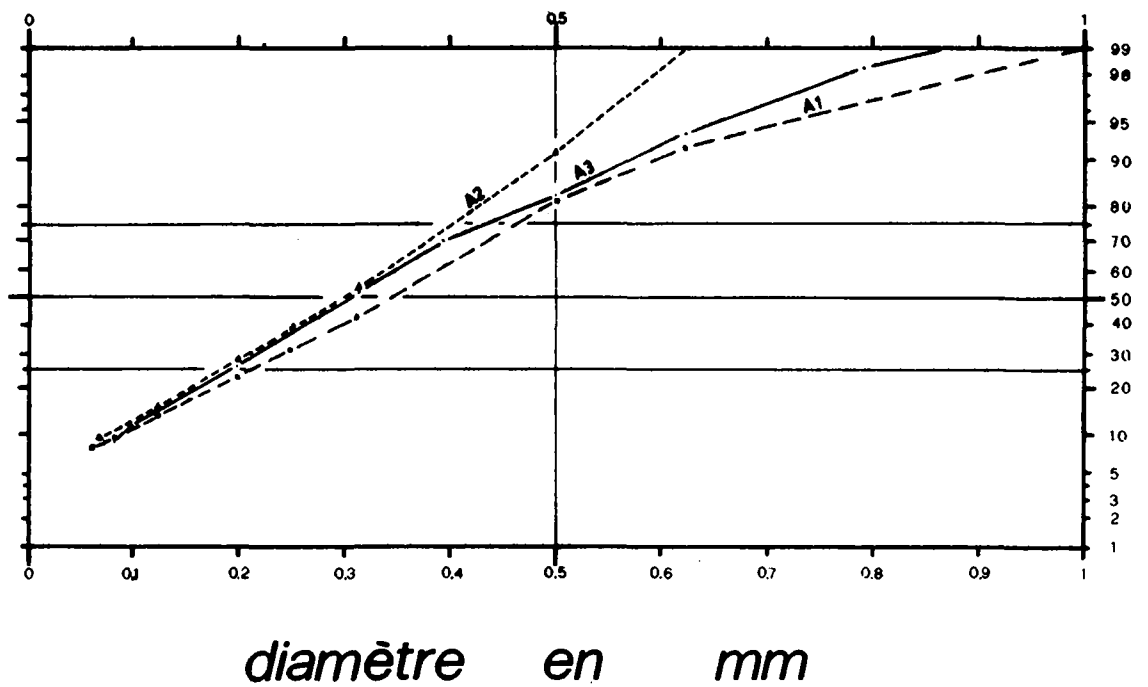
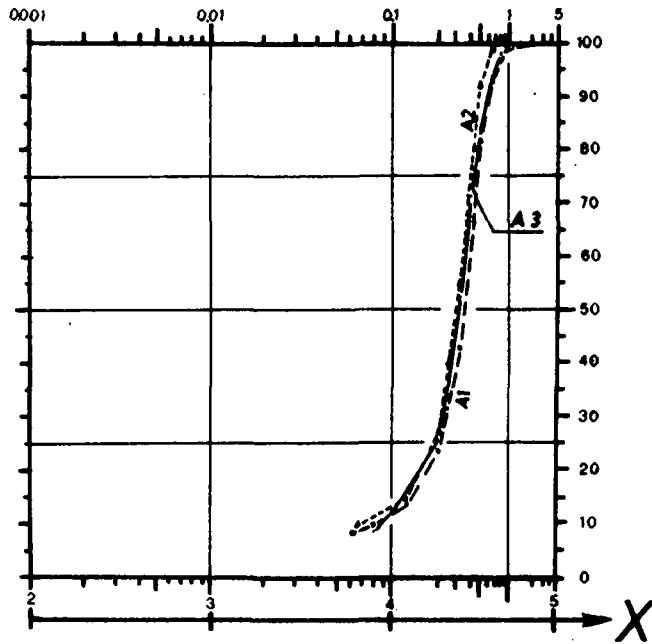


diamètre en mm

COURBES GRANULOMETRIQUES 2

AQUITANIEN

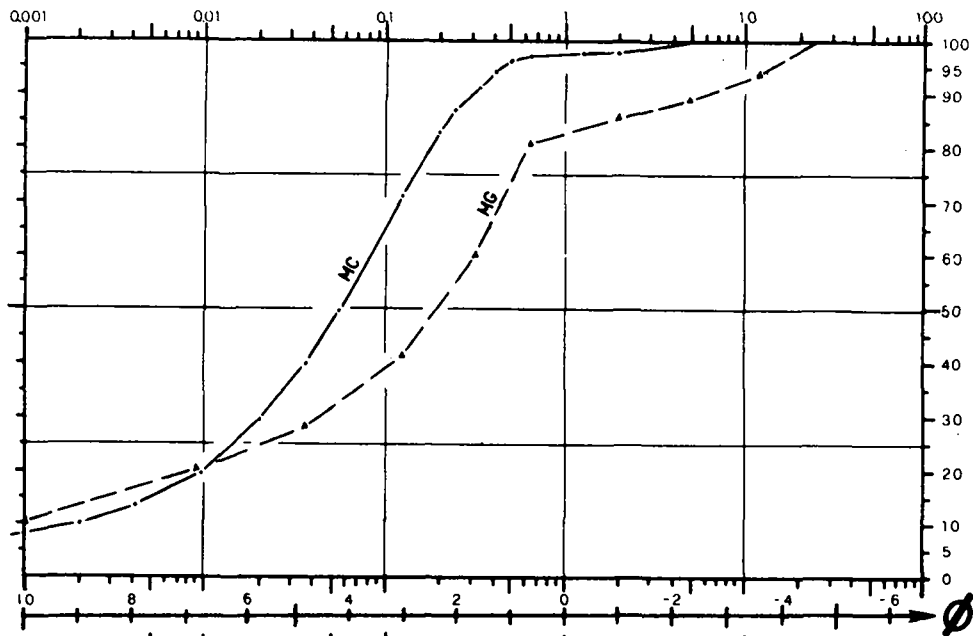
DOEGLAS 1946
pourcentage pondéral des tamisats
RIVIERE 1977



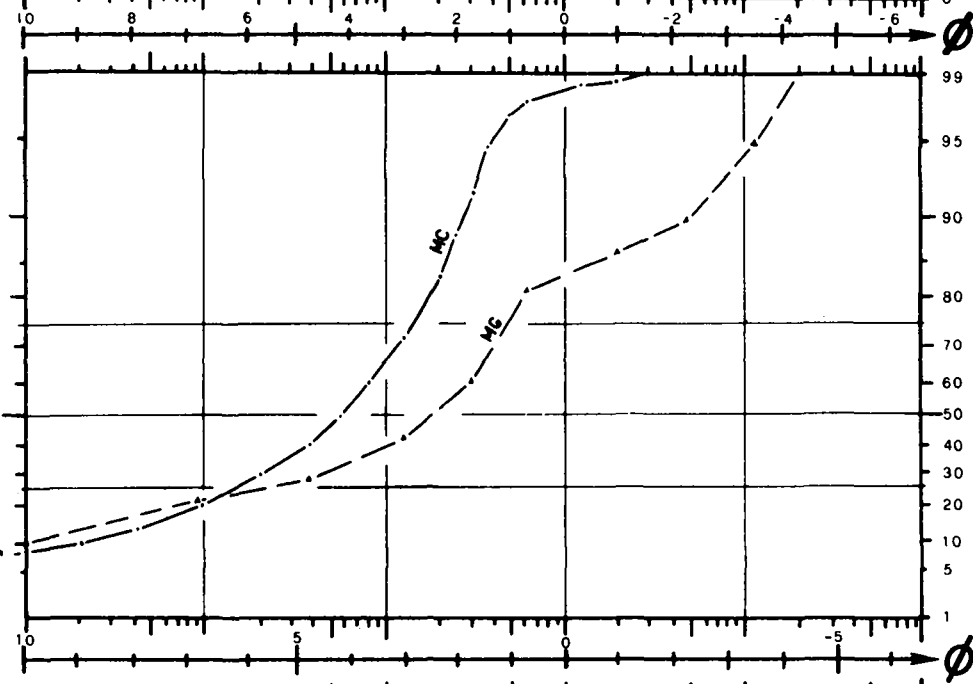
COURBES GRANULOMETRIQUES 1

MORAINE DE FOND

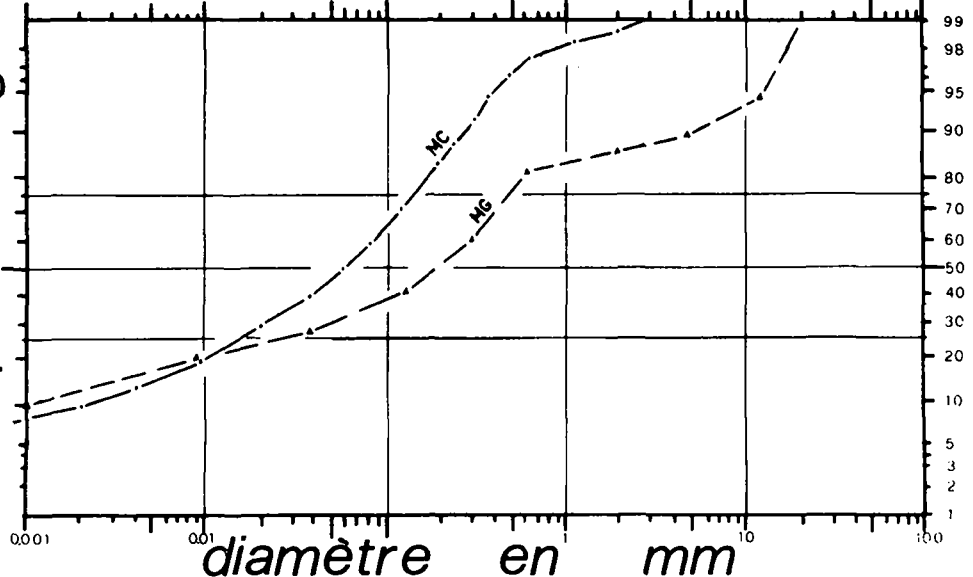
SNV 670810
tamisats



KITTLEMAN 1964
pondéral des



VISHER 1969
pourcentage

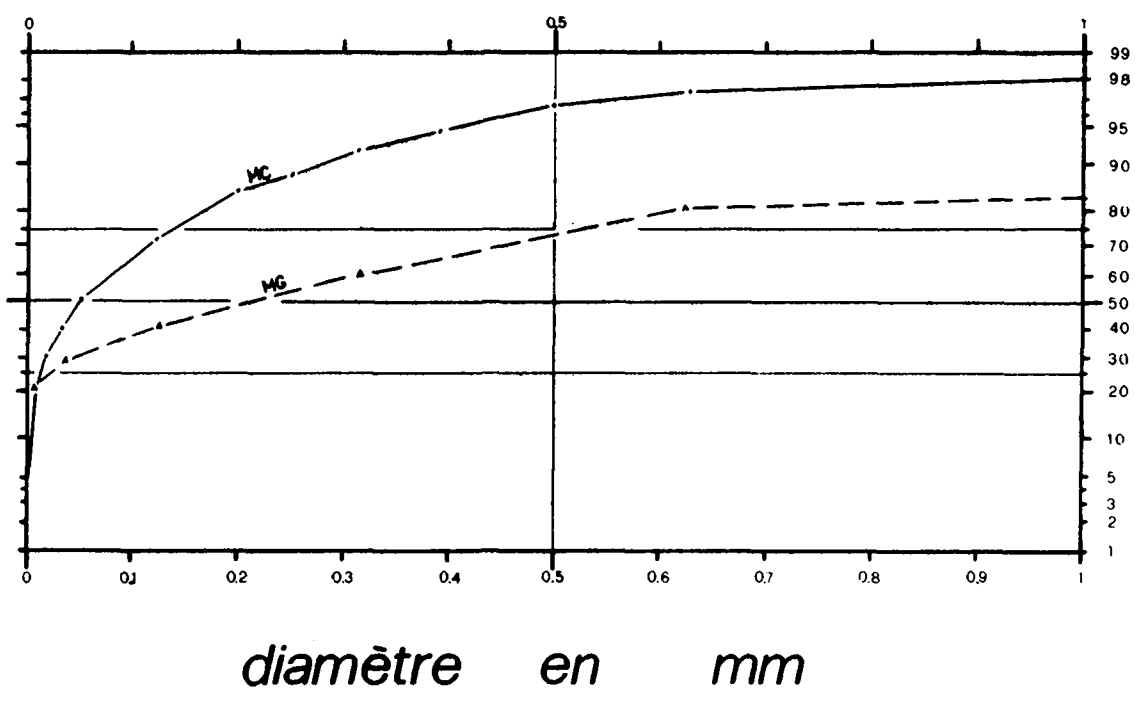
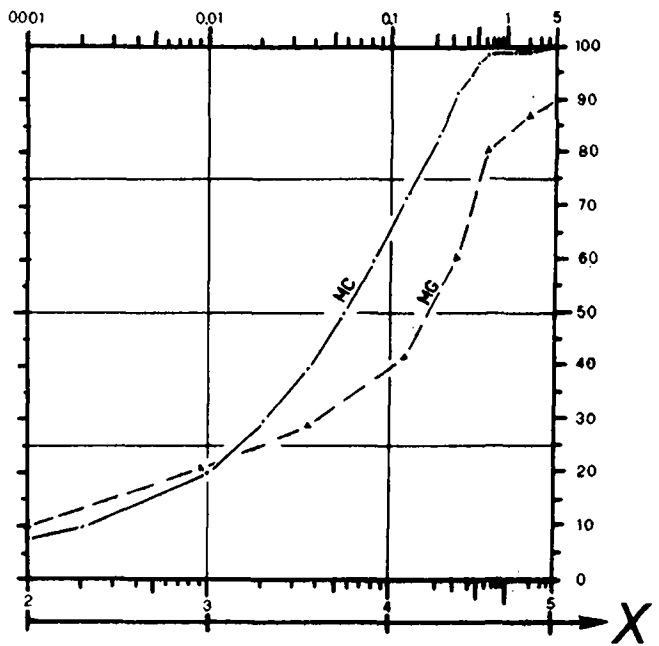


diamètre en mm

COURBES GRANULOMETRIQUES 2

MORAINES DE FOND

DOEGLAS 1946
pourcentage pondéral des tamisats
RIVIERE 1977



COURBES GRANULOMETRIQUES 1

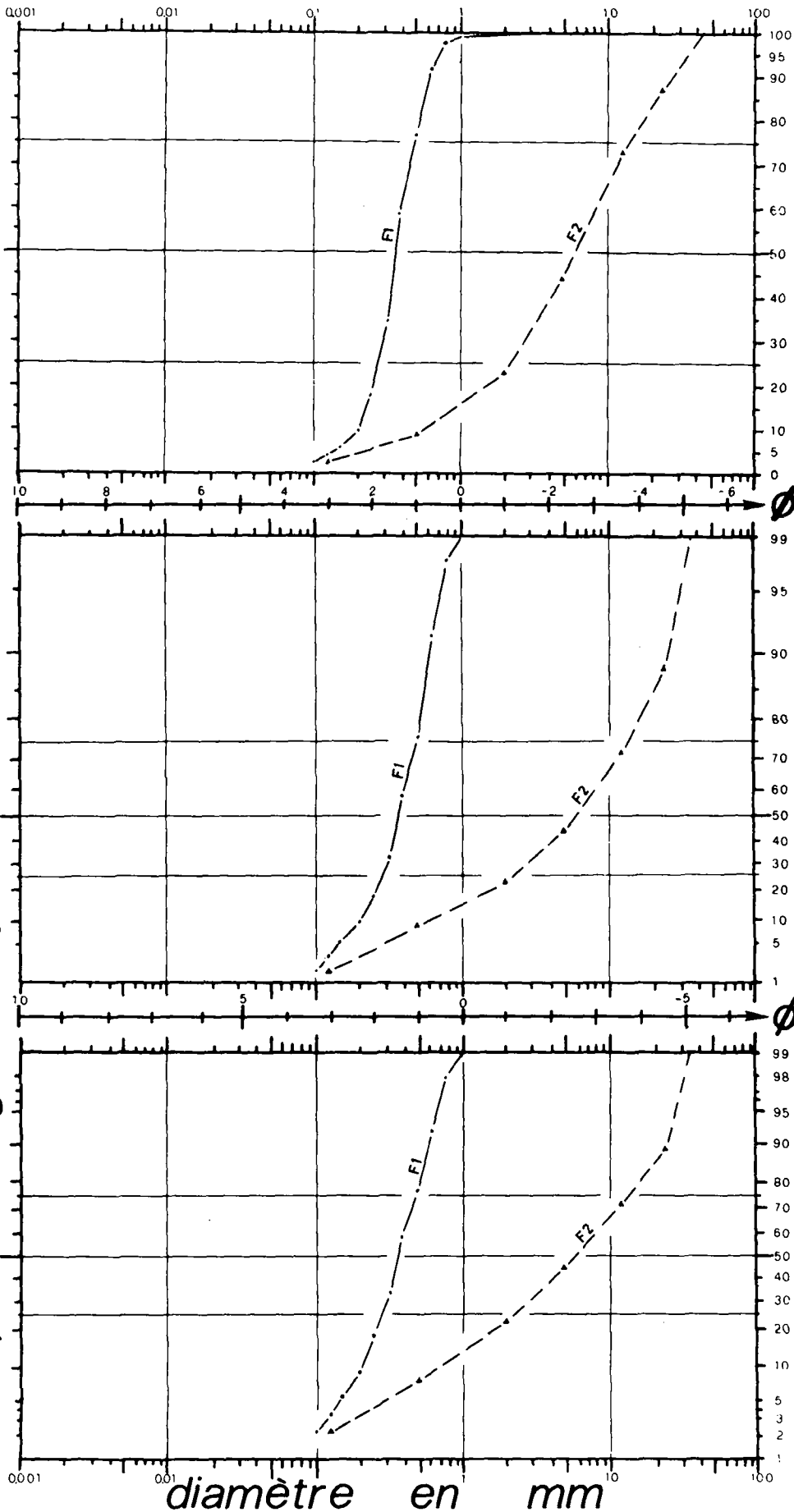
FORE-SET DE GRANGES

VISHER 1969
KITTLEMAN 1964
SNV 670810

tamisats

des
pondéral

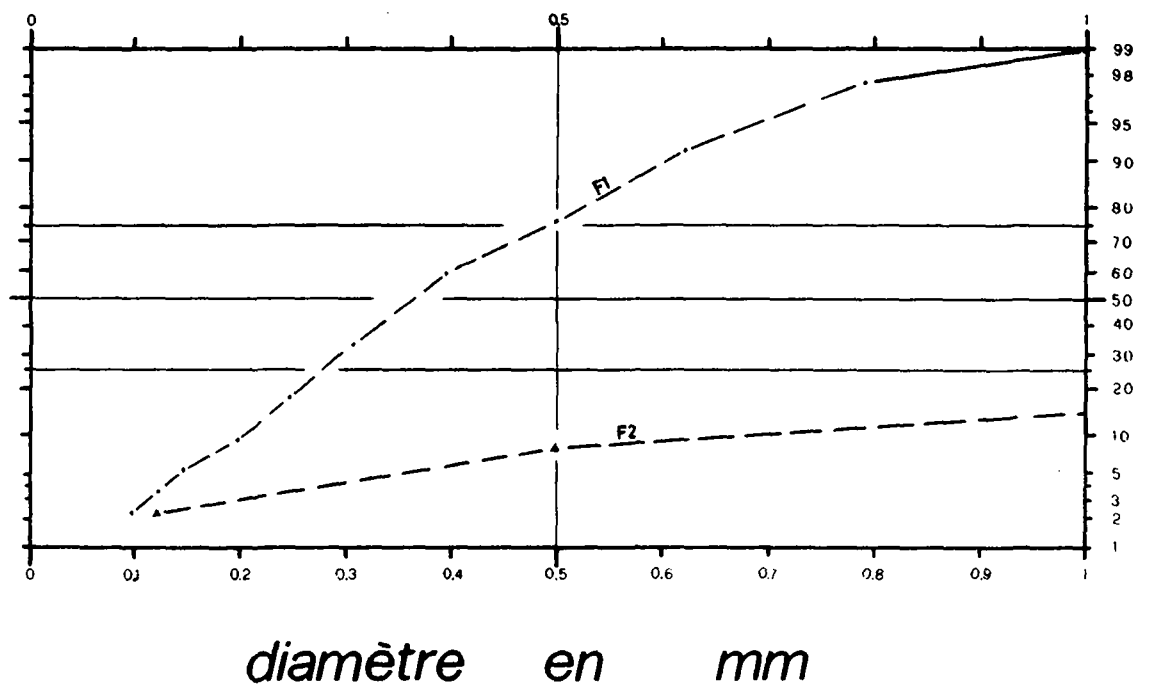
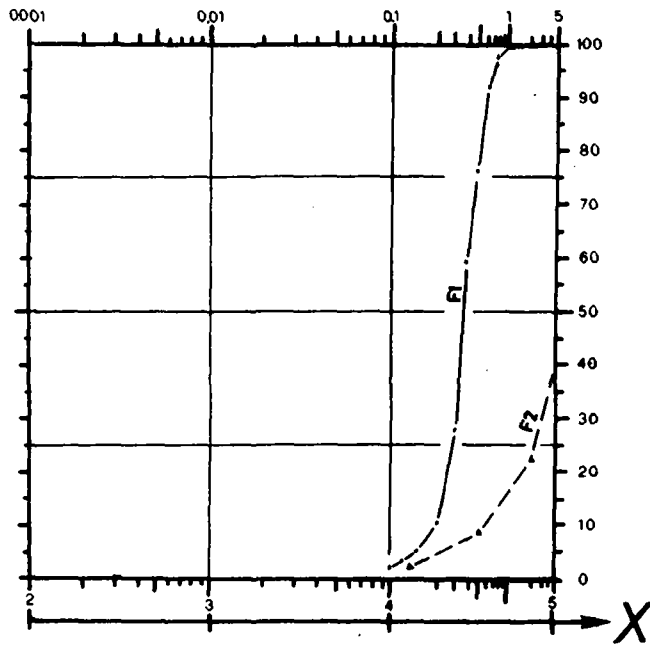
pourcentage



COURBES GRANULOMETRIQUES 2

FORE-SET DE GRANGES

RIVIERE 1977
DOEGLAS 1946
pourcentage pondéral des tamisats



COURBES GRANULOMETRIQUES 1

TOP-SET DE GRANGES

SNV 670810

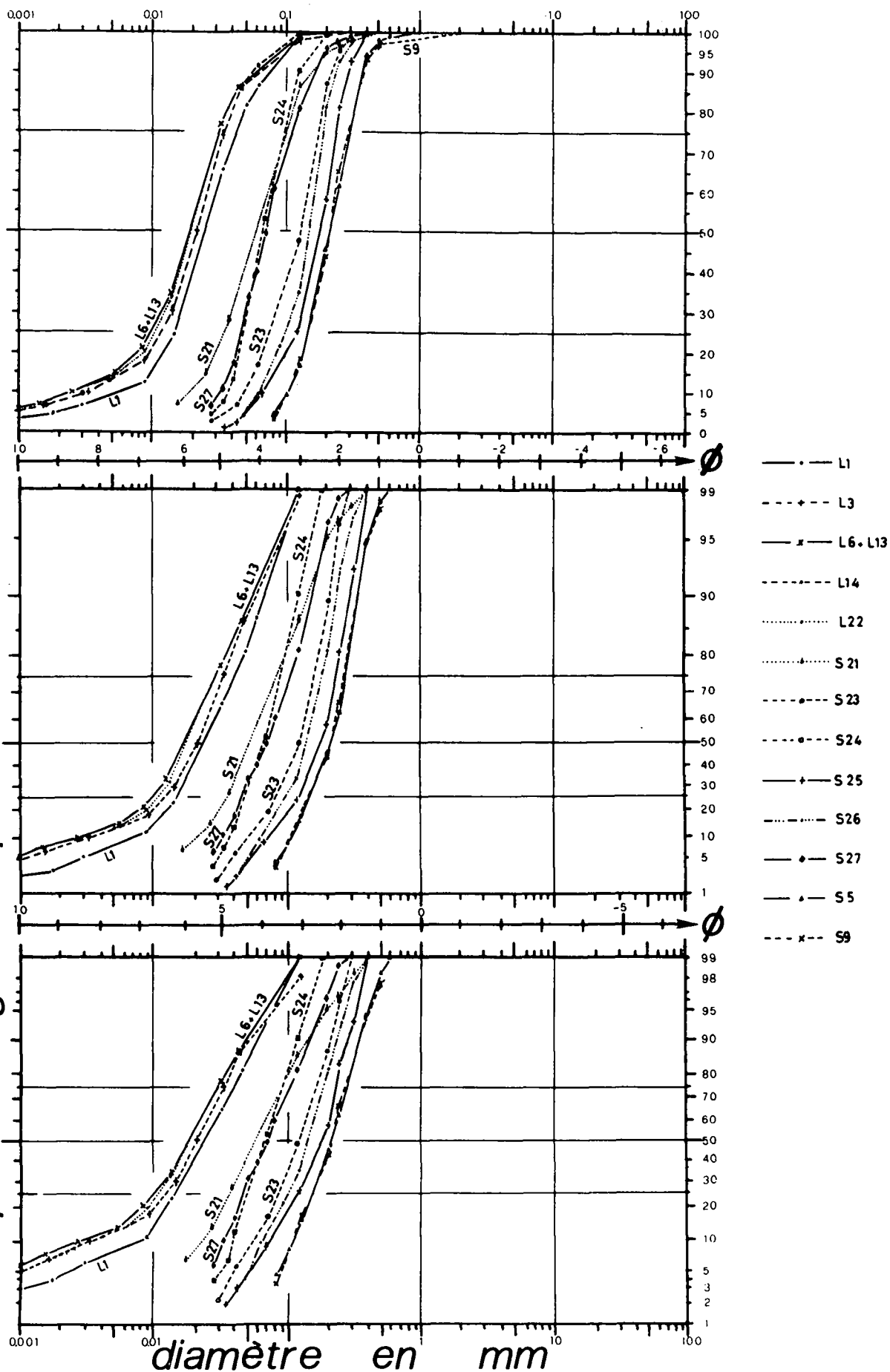
tamisats

KITTLEMAN 1964

des pondéral

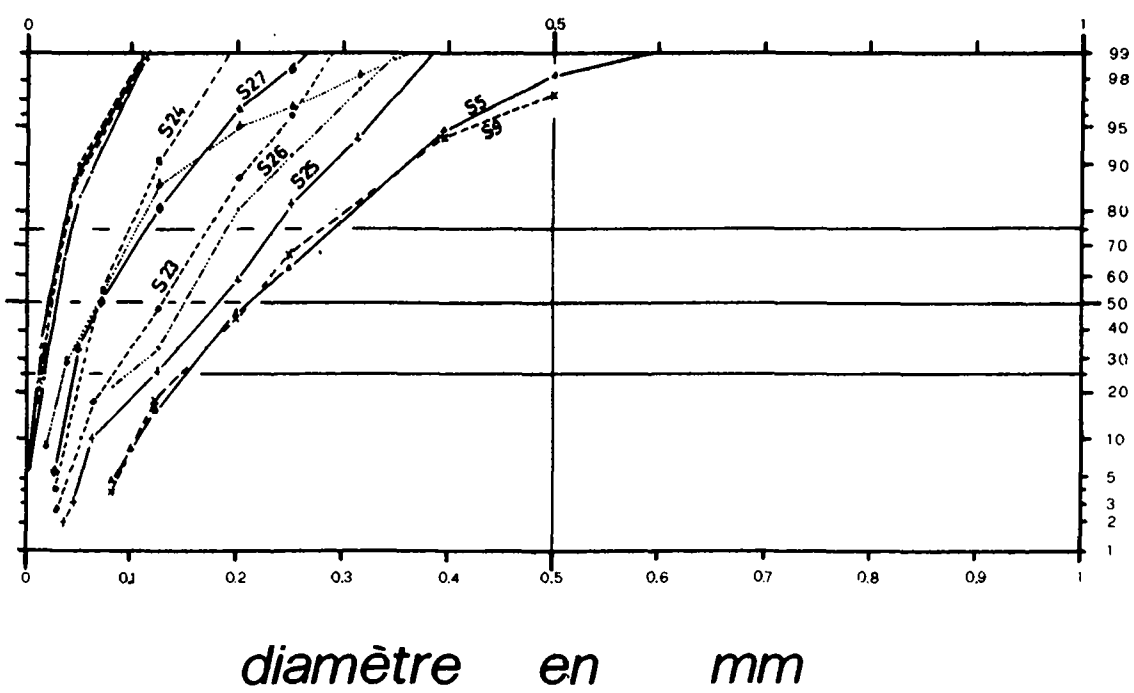
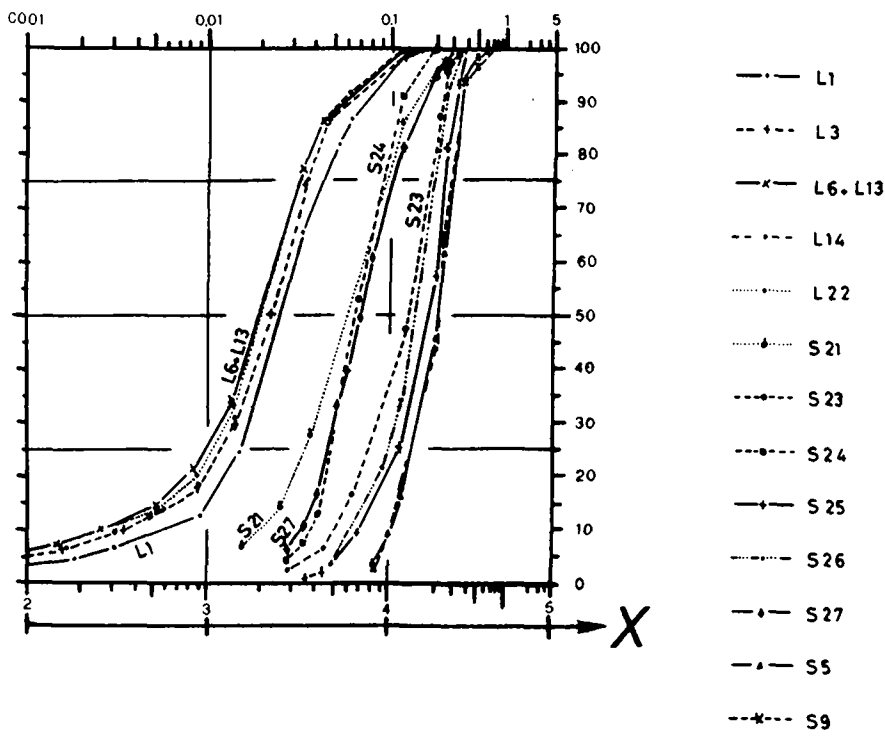
VISHER 1969

pourcentage



COURBES GRANULOMETRIQUES 2
TOP-SET DE GRANGES

DOEGLAS 1946
pourcentage pondéral des tamisats
RIVIERE 1977



diamètre en mm

Tableau 24: Définitions des indices granulométriques

| | définition | domaine de variation |
|------------------------------|--|---|
| <u>Moyenne</u> | $m_1 = \frac{1}{100} \int_0^{100} dy = \bar{d}$ où d est exprimé en mm ou par son logarithme | |
| Phi Mean Diameter | $M_\phi = \frac{1}{2} (\phi_{16} + \phi_{84})$ | |
| Mean Size | $Qd_\phi = \frac{1}{2} (\phi_{25} + \phi_{75})$ | |
| Mean Size | $Mz = \frac{1}{3} (\phi_{16} + \phi_{84} + \phi_{50})$ | |
| Mean Size | $M_{\phi 1} = \frac{1}{5} (\phi_{10} + \phi_{30} + \phi_{50} + \phi_{70} + \phi_{90})$ | |
| Mean Size | $M_{\phi 2} = \frac{1}{10} (\phi_5 + \phi_{15} + \phi_{25} \dots + \phi_{85} + \phi_{95})$ | |
| <u>Ecart-type</u> | $\sigma = (m_2)^{\frac{1}{2}}$ où $m_2 = \frac{1}{100} \int_0^{100} (d-\bar{d})^2 dy$ | |
| Phi Quartile Deviation | $\sigma_{\phi 1} = \frac{1}{2} (\phi_{25} - \phi_{75})$ | |
| Phi Quartile Deviation | $\sigma_{\phi a} = \frac{1}{1,35} (\phi_{25} - \phi_{75})$ | |
| Phi Deviation Measure | $\sigma_{\phi 2} = \frac{1}{2} (\phi_{16} - \phi_{84})$ | |
| Phi Deviation Measure | $\sigma_{\phi 3} = \frac{1}{4} (\phi_2 - \phi_{98})$ | |
| Phi Deviation Measure | $\sigma_{\phi 4} = \frac{1}{2,56} (\phi_{10} - \phi_{90})$ | |
| Phi Deviation Measure | $\sigma_{\phi 5} = \frac{1}{3,29} (\phi_5 - \phi_{95})$ | |
| Phi Deviation Measure | $\sigma_{\phi 6} = \frac{1}{5,4} (\phi_5 + \phi_{15} - \phi_{85} - \phi_{95})$ | |
| Inclus.Graph.Stand.Deviat. | $\sigma_I = \frac{1}{4} (\phi_{16} - \phi_4) + (\phi_5 - \phi_{95}) \frac{1}{6,6}$ | |
| Phi Deviation Measure | $\sigma_{\phi 7} = (\phi_3 + \phi_{10} + \phi_{20} + \phi_{30} - \phi_{70} - \phi_{80} - \phi_{90} - \phi_{97}) \frac{1}{9,1}$ | |
| Indice des quartiles | $I_{q1} = d_{75}/d_{25}$ | $1 < I_{q1} < 10^3$ |
| Indice des quartiles | $I_{q2} = (d_{75}/d_{25})^{\frac{1}{2}}$ | $1 < I_{q2} < 30$ |
| Sorting Index | $(So = (d_{80} - d_{20})/d_{50})$ | $0 < So < 10^3$ |
| <u>Etalement</u> | | |
| Coefficient d'uniformité | $U = d_{60}/d_{10}$ | $1 < U < 10^4$ |
| <u>Dissymétrie</u> | $Sk = m_3/(m_2)^{1,5}$ où $m_3 = \frac{1}{100} \int_0^{100} (d-\bar{d})^3 dy$ | |
| Phi Quartile Skewness | $S_{k\phi} = \frac{1}{2} (\phi_{25} + \phi_{75} - \phi_{50})$ | |
| Phi Skewness Measure | $\alpha_\phi = (\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50})/(\phi_{16} - \phi_{84})$ | $-1 < S_{k\phi}, \alpha_\phi < +1$ (fines) |
| Phi Skewness Measure | $\alpha_{2\phi} = (\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50})/(\phi_{16} - \phi_{84})$ | $-2 < \alpha_{2\phi} < +2$ (fines) |
| Inclusive Graphic Skewness | $SK_I = \frac{1}{2} \alpha_\phi + (\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50})/2(\phi_5 - \phi_{95})$ | $-1 < SK_I < +1$ (fines) |
| (Coefficient quart.de diss. | $Cqd = (d_{25} + d_{75} - 2d_{50})/(d_{75} - d_{25})$ | |
| (Coefficient cent. de diss. | $Ccd = (d_{10} + d_{90} - 2d_{50})/(d_{90} - d_{10})$ | |
| Coefficient of Skewness | $Sk_1 = (d_{25} \cdot d_{75})/(d_{50})^2$ | $0 < Sk_1 < 10^3$ (grossières) |
| Coefficient of Skewness | $Sk_2 = (Sk_1)^{\frac{1}{2}}$ | $0 < Sk_2 < 30$ (grossières) |
| Gradation | $\sigma_b = \frac{1}{2} (d_{84}/d_{50} - d_{50}/d_{16})$ | $-5 < \sigma_b < 5$ (grossières) |
| Coefficient de courbure | $C = d_{30}^2/(d_{10} \cdot d_{60})$ | |
| <u>Degré de pic</u> | $K = m_4/(m_2)^2$ où $m_4 = \frac{1}{100} \int_0^{100} (d-\bar{d})^4 dy$ | |
| Phi Quartile Kurtosis | $K_\phi = (\phi_{25} - \phi_{75})/2(\phi_{10} - \phi_{90})$ | $0 < k_\phi < 0,5$; $K_\phi \text{ normal} = 0,26$ |
| Phi Kurtosis Measure | $\beta_\phi = (\phi_5 - \phi_{95}) - (\phi_{16} - \phi_{84})/(\phi_{16} - \phi_{84})$ | $0 < \beta_\phi < 5$; $\phi \text{ normal} = 0,66$ |
| Graphic Kurtosis | $KG = (\phi_5 - \phi_{95})/2,44(\phi_{25} - \phi_{75})$ | $0,41 < KG < 10$; $KG \text{ normal} = 1,0$ |
| (Kelley's Quartile Kurtosis | $K = (d_{75} - d_{25})/2(d_{90} - d_{10})$ | $0 < K < 0,5$; $K \text{ normal} = 0,26$ |

Tableau 25: Valeurs des indices granulométriques tirées de la littérature

| Auteurs | Dépôts | Nbre de mesures | Mz \pm éc.-type | Mz min/max | $\bar{\sigma}_I \pm$ éc.-type | $\sigma_{I \min}/\sigma_{I \max}$ |
|-------------------|--------------------------------------|-----------------|-------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| v.Husen 1979 | Moraine de fond | - | 2,73 | 1,53/4,13 | 5,31 | 4,03/5,88 |
| | Moraine de fond | - | -0,41 | -1,03/0,13 | 4,48 | 4,16/4,70 |
| German et al 1977 | Moraine de fond | - | 3,6 | - | 2,4 | - |
| | Moraine bordière | - | -1,4 | - | 2,8 | - |
| | Fluvioglaciale | - | -2,1 | - | 2,4 | - |
| Schluechter 1978 | Moraine de fond | 42 | 0,98 \pm 1,37 | -2,23/3,42 | 5,11 \pm 0,58 | 3,83/6,70 |
| | Mud till + bottom-set | 82 | 6,60 \pm 1,90 | 0,27/8,91 | 2,97 \pm 1,08 | 1,48/6,36 |
| | Fluvioglaciale | 40 | -2,01 \pm 1,12 | -4,05/0,73 | 3,62 \pm 0,68 | 2,58/5,30 |
| cette étude | Moraine de fond | 2 | 4,05 | 3,70/4,70 | - | 2,73/4,64 |
| | Delta: top-set (sables et limons) | 11 | 4,23 \pm 1,58 | 2,3(S)/6,01(L) | 1,15 \pm 0,45 | 0,72(S)/1,72(L) |
| | fore-set | 2 | -0,38 | -2,26/1,50 | - | 0,66/2,20 |

Tableau 26 : Résultats numériques des indices granulométriques de la Lembe

| unité | Moyenne | | | | Iri | | | | | | | Dissymétrie | | | | Degré de pic | | | d ₉₉ | |
|-------|----------------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|-----------------|-------|
| | M _φ | Q _{dφ} | Mz | M _{φ1} | σ _{φ1} | σ _{φ2} | σ _I | σ _{φ6} | I _{g2} | So | U | S _{kφ} | α _{2φ} | S _{k1} | σ _b | C | K _φ | β _φ | | KG |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| φ | φ | φ | φ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | mm |
| A1 | 1,93 | 1,69 | 1,85 | 1,90 | 0,57 | 1,01 | - | - | 1,48 | 0,97 | 4,56 | 0,11 | - | 0,86 | -0,50 | 1,74 | 0,20 | - | - | 0,95 |
| A2 | 2,03 | 1,91 | 2,01 | 2,07 | 0,57 | 0,91 | - | - | 1,48 | 0,96 | 4,79 | 0,07 | - | 0,91 | -0,26 | 1,86 | 0,20 | - | - | 0,65 |
| A3 | 2,03 | 1,84 | 1,97 | 2,00 | 0,61 | 1,06 | - | - | 1,16 | 1,52 | 4,13 | 0,11 | 0,85 | 0,86 | -0,43 | 1,59 | 0,22 | 0,89 | 1,35 | 3 |
| MC | 4,83 | 4,50 | 4,70 | 4,88 | 1,66 | 2,95 | 2,73 | 2,78 | 3,16 | 2,87 | 40,5 | 0,34 | 0,78 | 0,63 | -2,84 | 2,47 | 0,23 | 0,89 | 1,19 | 3 |
| MG | 3,87 | 3,31 | 3,70 | 3,71 | 2,34 | 4,13 | 4,64 | 4,82 | 5,05 | 3,03 | 309,75 | 0,95 | 0,59 | 0,27 | -21,91 | 6,34 | 0,19 | 0,77 | 1,29 | 20 |
| L1 | 5,38 | 5,32 | 5,45 | 5,56 | 0,74 | 1,22 | 1,45 | 1,50 | 1,67 | 1,37 | 5,16 | -0,01 | 0,61 | 1,01 | -0,08 | 1,55 | 0,20 | 1,26 | 1,53 | 0,12 |
| L3 | 5,87 | 5,68 | 5,83 | 5,98 | 0,76 | 1,29 | 1,62 | 1,71 | 1,69 | 1,39 | 7,79 | 0,07 | 0,89 | 0,90 | -0,44 | 2,35 | 0,18 | 1,48 | 1,73 | 0,125 |
| L6 | 6,04 | 5,85 | 5,98 | 6,15 | 0,86 | 1,39 | 1,68 | 1,75 | 1,81 | 1,46 | 9,09 | 0,14 | 0,74 | 0,82 | -0,61 | 2,38 | 0,18 | 1,32 | 1,55 | 0,11 |
| L13 | 6,08 | 5,85 | 6,01 | 6,16 | 0,86 | 1,43 | 1,72 | 1,80 | 1,81 | 1,49 | 9,23 | 0,11 | - | 0,86 | -0,65 | 2,36 | 0,18 | 1,32 | 1,59 | 0,105 |
| L14 | 5,80 | 5,68 | 5,80 | 5,96 | 0,76 | 1,30 | 1,62 | 1,70 | 1,69 | 1,41 | 7,68 | 0,07 | - | 0,90 | -0,33 | 2,37 | 0,18 | 1,47 | 1,72 | 0,105 |
| L22 | 5,94 | 5,76 | 5,88 | 6,06 | 0,82 | 1,33 | - | - | 1,76 | 1,44 | 8,62 | 0,11 | - | 0,85 | -0,51 | 2,46 | 0,18 | - | - | 0,12 |
| S5 | 2,28 | 2,28 | 2,31 | 2,35 | 0,54 | 0,72 | 0,71 | 0,71 | 1,45 | 0,85 | 2,38 | 0,02 | 0,32 | 0,97 | -0,04 | 0,94 | 0,30 | 0,62 | 0,88 | 0,6 |
| S9 | 2,32 | 2,31 | 2,35 | 2,38 | 0,52 | 0,75 | 0,71 | 0,70 | 1,43 | 0,83 | 2,27 | 0,06 | 0,25 | 0,92 | -0,08 | 1,00 | 0,28 | 0,50 | 0,88 | 0,8 |
| S21 | 4,13 | 4,10 | 4,15 | 4,22 | 0,78 | 1,08 | - | - | 1,71 | 1,33 | 3,74 | 0,04 | - | 0,94 | -0,11 | 1,18 | 0,26 | - | - | 0,4 |
| S23 | 3,23 | 3,20 | 3,17 | 3,22 | 0,64 | 0,83 | 0,84 | 0,84 | 1,56 | 0,91 | 1,56 | 0,21 | 0,55 | 0,75 | -0,30 | 0,91 | 0,30 | 0,67 | 0,89 | 0,3 |
| S24 | 3,88 | 3,85 | 3,92 | 3,96 | 0,53 | 0,69 | 0,72 | 0,73 | 1,44 | 0,92 | 1,44 | -0,09 | -0,03 | 1,12 | 0,07 | 0,93 | 0,29 | 0,78 | 0,96 | 0,19 |
| S25 | 2,81 | 2,57 | 2,74 | 2,75 | 0,48 | 0,87 | 0,84 | 0,85 | 1,40 | 0,84 | 1,40 | 0,08 | 0,55 | 0,89 | -0,41 | 1,27 | 0,21 | 0,55 | 1,14 | 0,4 |
| S26 | 3,02 | 2,86 | 2,98 | 2,97 | 0,46 | 0,77 | 0,76 | 0,76 | 1,38 | 0,81 | 1,38 | 0,04 | 0,36 | 0,94 | -0,25 | 1,18 | 0,24 | 0,59 | 1,09 | 0,4 |
| S27 | 3,80 | 3,84 | 3,88 | 3,92 | 0,63 | 0,91 | - | - | 1,55 | 1,09 | 1,55 | 0,01 | - | 0,99 | 0,04 | 0,96 | 0,27 | - | - | 0,3 |
| F1 | 1,48 | 1,43 | 1,50 | 1,50 | 0,40 | 0,61 | 0,66 | 0,66 | 1,32 | 0,70 | 1,98 | -0,02 | 0,38 | 1,03 | -0,03 | 1,06 | 0,26 | 0,89 | 1,20 | 0,9 |
| F2 | -2,21 | -2,49 | -2,26 | -2,18 | 1,32 | 2,18 | 2,20 | 2,20 | 2,49 | 2,61 | 14,91 | 0,12 | 0,52 | 0,85 | -1,27 | 1,60 | 0,24 | 0,68 | 1,14 | 42 |

Annexe 3

Equations mathématiques des courbes granulométriques

Tableau 27 : Equation des courbes granulométriques en fonction du pourcentage pondéral

| | Equation | Remarques |
|---|--|--|
| 1 | $d = 10^{\frac{p - P_o}{A}}$ | Po = valeur à l'ordonnée (d = 1 μm) A = pente de la droite |
| 2 | $d = D \lg_{10} \frac{A}{p - P_o}$ | 3 points de mesures nécessaires pour déterminer Po, A, D, p.ex.: d ₁₀ , d ₅₀ , d ₉₀ (résolution de 3 équations à 3 inconnues) |
| 3 | $d = 10^{\left[\frac{\lg_{10} \frac{P}{100} (10^{\frac{N \lg_{10} d_{max}}{100} - 1) + 1}{N}} \right]}$ | N, la seule inconnue, s'obtient avec d=d _{moyen} grâce à l'équation: $\frac{\lg_{10} d}{\lg_{10} d_{max}} - \frac{10^{\frac{N \lg_{10} d_{max}}{100} - 1}}{10^{\frac{N \lg_{10} d_{max}}{100} - 1}} + \frac{N \lg_{10} d_{max} \ln_{10} 1}{N \lg_{10} d_{max} \ln_{10} 10} = 0$ (Rivière 1977 p.89) ou avec n'importe quel autre diamètre grâce à l'équation (3) de ce tableau |
| 4 | $d = 10^{\frac{\lg(\frac{p - P_o}{A})}{\frac{B}{A}} - C}$ | 5 points de mesures nécessaires pour déterminer A, B, C, Po (2 points suffisent si les coordonnées du centre de symétrie Po et C = lg ₁₀ Po sont connues) |

p = pourcentage pondéral
d = diamètre équivalent, d_{max} = diamètre équivalent maximum (μm)
A, B, C, D, M. N, P_o : constantes

Tableau 28 : Equations des courbes granulométriques en fonction du diamètre équivalent

| | Equation | Remarques |
|---|--|--|
| 1 | $p = P_o + A \cdot \lg_{10} d$ où $P_{i-1} < p < P_{i+1}$ | décomposition de la courbe en plusieurs segments de droites conformément aux points de mesure |
| 2 | $p = P_o + \frac{A}{10^{d/D}}$ | allure sigmoïde ou concave |
| 3 | $p = 100 \frac{10^{N \cdot \lg_{10} d} - 1}{10^{N \cdot \lg_{10} d_{\max}} - 1}$ | N détermine la convexité ou la concavité de la courbe (Rivière 1977) |
| 4 | $p = A \cdot \lg_{10} d + B \cdot \lg_{10}^2 d + C \cdot \lg_{10} d + \dots + M$ | régression polynomiale: instabilité possible de la fonction entre deux points de mesure grande densité de points nécessaire près des bornes d_{\min} et d_{\max} |
| 5 | $p = P_o + A \cdot \arctg B(\lg_{10} d + C)$ | fonction arctangente translatée, allure sigmoïde symétrique |
| 6 | $p = P_o + D \cdot \argsh B(\lg_{10} d + C) =$ $P_o + A \lg_{10} (B(\lg_{10} d + C) + ((B(\lg_{10} d + C))^2 + 1)^{1/2})$ | fonction sinus hyperbolique inverse translatée allure sigmoïde symétrique |

p = pourcentage pondéral
d = diamètre équivalent, d_{\max} = diamètre équivalent maximum (μm)

A, B, C, D, M, N, P_o : constantes

Tableau 29: Equations mathématiques de la courbe granulométrique
S5 - sable deltaïque de Granges

1. Expressions mathématiques

p en %, d en μm

(1) fonction logarithmique

$$\text{tronçon: } p = 16,61 - 94,79\% : p = -312,19 + 156,80 \lg_{10} d$$

(2) fonction exponentielle inverse

$$p = 191 - \frac{220}{10^{d/1093}}$$

(3a) fonction exponentielle Rivière

$$p = 100 \cdot \frac{10^{1,87 \cdot \lg_{10} d} - 1}{10^{1,87 \cdot \lg_{10} 400} - 1}$$

$$N = 1,87 \text{ obtenu avec } d_{4,88} = 80 \mu\text{m}$$

(3b) fonction exponentielle Rivière

$$p = 100 \cdot \frac{10^{1,106 \lg_{10} d} - 1}{10^{1,106 \lg_{10} 400} - 1}$$

$$N = 1,106 \text{ obtenu avec } d_{46,38} = 200 \mu\text{m}$$

(4) fonction polynomiale du cinquième degré

$$p = -49570,95255 + 109429,21567 \lg_{10} d - 95602,12666 \lg_{10}^2 d \\ + 41265,0023 \lg_{10}^3 d - 8791,08123 \lg_{10}^4 d + 739,61058 \lg_{10}^5 d$$

$$(r^2 = 0,99913, \text{ obtenu par le "statistical library" de hp 9836})$$

(5) fonction tangente inverse

$$p = 50 + 57,374 \operatorname{arctg} 2,45 (\lg_{10} d - 2,312)$$

obtenu en fixant $P_o = 50$ et $\lg_{10} d_{50} = 2,312$

la courbe passe par $p_1 = 4,88\%$ et $p_2 = 61,92\%$

(6) fonction sinus hyperbolique inverse

$$p = 50 + 83,501 \lg_{10} \left((3,89(\lg_{10} d - 2,312)) + ((3,89(\lg_{10} d - 2,312))^2 + 1)^{\frac{1}{2}} \right)$$

obtenu en fixant $P_o = 50\%$, $\lg_{10} d_{50} = 2,312$

la courbe passe par $p_1 = 4,88\%$ et $p_2 = 61,92\%$

Tabl. 30: Résultats numériques des équations mathématiques: sable deltaïque S5

| valeurs mesurées | P (%) | 4,88 | 9,21 | 16,61 | 46,38 | 61,92 | 94,79 | 98,28 | 100 |
|-------------------|----------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | d (μm) | 80 | 100 | 125 | 200 | 250 | 394 | 500 | 1000 |
| valeurs calculées | Equation | | | | | | | | |
| | (1) | - | - | 125 | 194 | 243 | 394 | - | - |
| | (2) | 80 | 91 | 111 | 200 | 254 | 394 | 412 | 420 |
| | (3a) | 80 | 112 | 153 | 265 | 310 | 389 | 396 | 400 |
| | (3b) | 27 | 47 | 79 | 200 | 260 | 381 | 394 | 400 |
| | (4) | 80 | 100 | 125 | 202 | 245 | 418 | 471 | 987 |
| | (5) | 80 | 91 | 110 | 193 | 250 | 520 | 586 | 627 |
| | (6) | 80 | 91 | 110 | 193 | 250 | 521 | 582 | 617 |

Fig.63. Graphes des équations mathématiques: sable deltaïque S5 de Granges

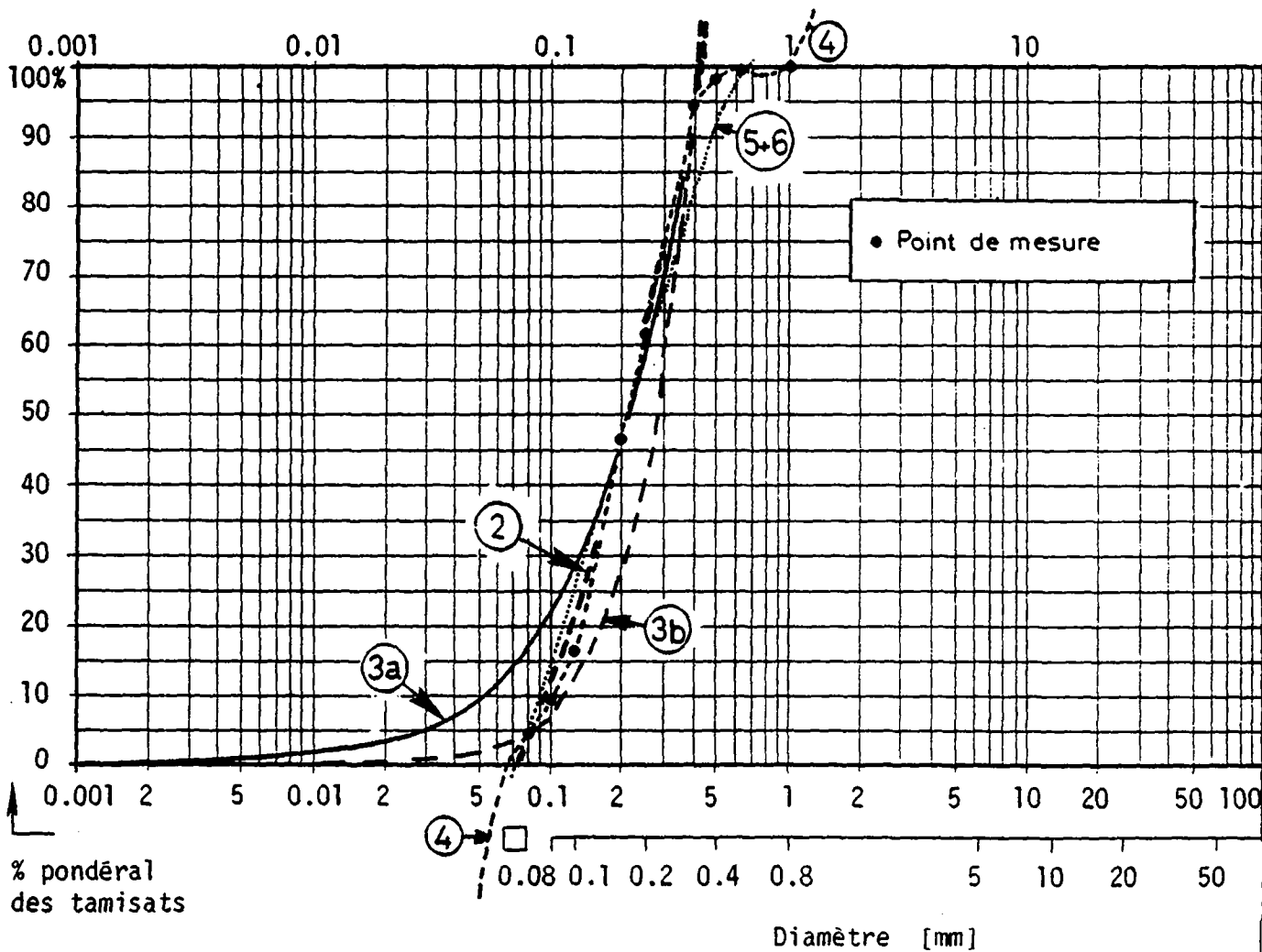


Tableau 31: Equations mathématiques de la courbe granulométrique
MC - Moraine de fond de Coumin

1. Expressions mathématiques

p en %; d en μm

(2) Fonction exponentielle inverse

$$p = 95,7 - \frac{88,76}{10^{d/191,8}}$$

(3) fonction exponentielle Rivière

$$p = 100 \frac{10^{0,261 \cdot \lg_{10} d} - 1}{10^{0,261 \cdot \lg_{10} 400} - 1}$$

N = 0,261 obtenu avec $d_{47} = 50 \mu\text{m}$

(4) fonction polynomiale du huitième degré

$$\begin{aligned} p = & 7,91783 + 83,54383 \lg_{10} d - 399,24566 \lg_{10}^2 d \\ & + 826,23424 \lg_{10}^3 d - 868,99412 \lg_{10}^4 d + 515,78332 \lg_{10}^5 d \\ & - 172,22268 \lg_{10}^6 d + 30,0088 \lg_{10}^7 d - 2,11289 \lg_{10}^8 d \\ & (r^2 = 0,99995, \text{ obtenu par le "statistical library" de hp 9836}) \end{aligned}$$

(5) fonction tangente inverse

$$p = 53 + 34,392 \arctg (2,07 (\lg_{10} d - 1,799))$$

obtenu en fixant $P_0 = 53$ et $\lg_{10} d_{53} = 1,799$

la courbe passe par $p_1 = 8\%$ et $p_2 = 72\%$

(6) fonction sinus hyperbolique inverse

$$p = 53 + 34,894 \lg_{10} [\{ 5,40(\lg_{10} d - 1,799) \} + \{ \{ 5,40(\lg_{10} d - 1,799) \}^2 + 1 \}^{\frac{1}{2}}]$$

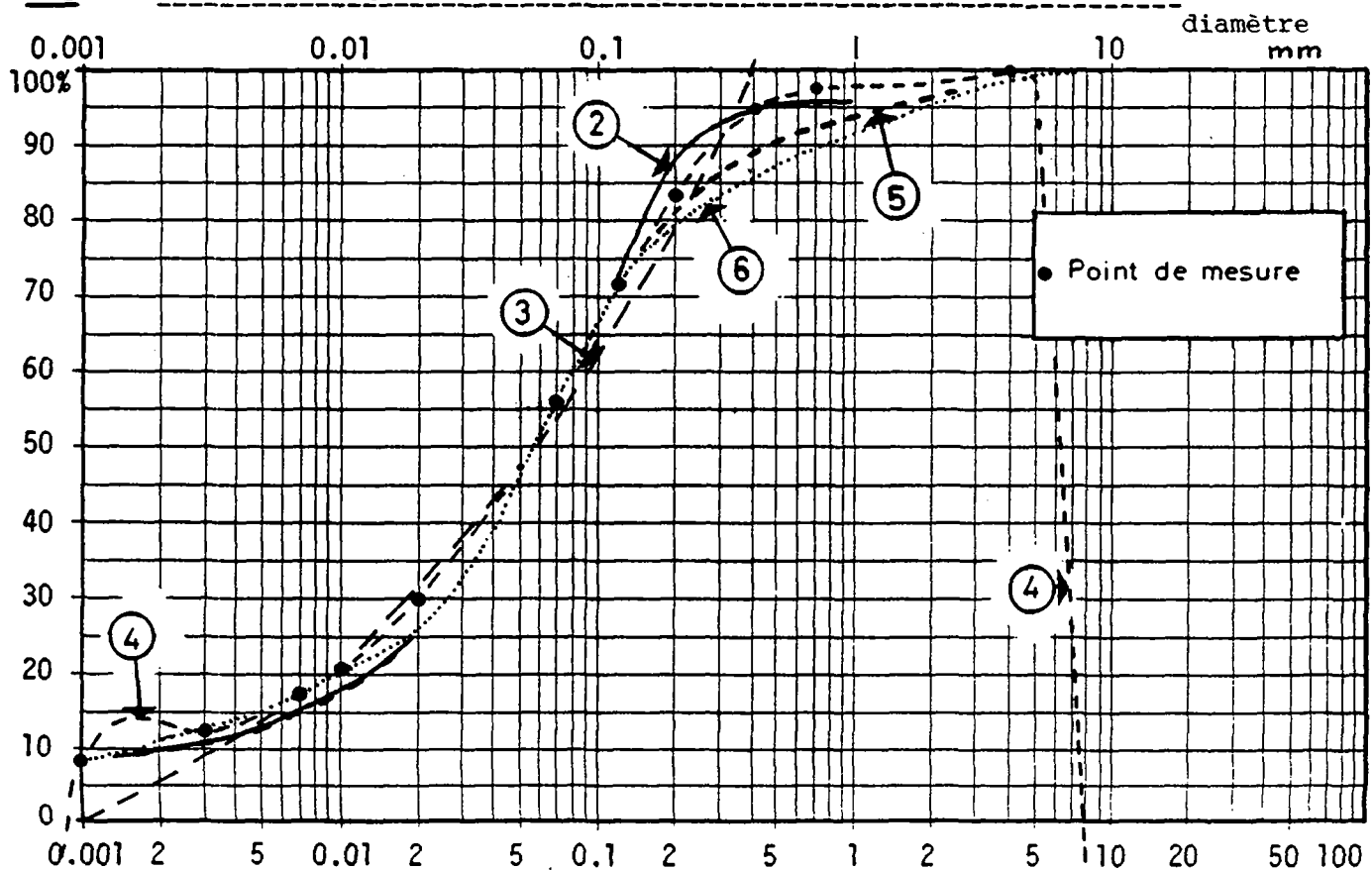
obtenu en fixant $P_0 = 53$ et $\lg_{10} d_{53} = 1,799$

la courbe passe par $p_1 = 8\%$ et $p_2 = 72\%$

Tabl.32. Résultats numériques des équations mathématiques: moraine de fond MC

| valeurs | p(%) | 8 | 12,5 | 17 | 21 | 30 | 47 | 56 | 72 | 83 | 95 | 97 | 99 |
|-----------|-------|-----|------|------|-----|----|----|----|-----|-----|------|------|------|
| mesurées | d(μm) | 1 | 3 | 7 | 10 | 20 | 50 | 70 | 125 | 200 | 400 | 600 | 3000 |
| Equation | | | | | | | | | | | | | |
| valeurs | (2) | 1,0 | 5,4 | 10,0 | 14 | 25 | 50 | 67 | 110 | 162 | 403 | - | - |
| | (3) | 2,7 | 4,4 | 6,7 | 9,4 | 18 | 50 | 78 | 153 | 230 | 343 | 365 | 388 |
| | (4) | 1,0 | 3,0 | 6,9 | 10 | 20 | 49 | 70 | 127 | 197 | 412 | 585 | 2950 |
| calculées | (5) | 1,0 | 4,3 | 9,1 | 14 | 26 | 52 | 69 | 125 | 237 | 1332 | 2570 | 6802 |
| | (6) | 1,0 | 2,9 | 6,5 | 11 | 25 | 53 | 69 | 125 | 286 | 1875 | 3040 | 5265 |

Fig.64. Graphes des équations mathématiques: moraine de fond MC de Coumin



Annexe 4

**Inventaire des termes décrivant les déformations
pénécontemporaines des sédiments**

INVENTAIRE DES TERMES DECRIVANT LES DEFORMATIONS PENECONTEMPORAINES

a) Ball-and-pillow

Définition: déformations en forme de boule ou de pillow (-lava)
(SMITH 1916, p. 146)

- 1) air heave structure: STEWART 1956, p. 155
- 2) ball-or-pillow form structure:
SMITH 1916, p. 146,
fide POTTER + PETTIJOHN, 1977, p. 201
- 3) convolute lamination: COLEMAN + GAGLIANO, 1965, p. 138
- 4) convolution ball: TEN HAAF, 1956, p. 435
- 5) convolutional ball: SCHLUECHTER + KNECHT, 1979, p. 191
- 6) contorted strata: EMERY, 1950
- 7) drop structure: DZULYNSKI + KUBICZ, 1975, p. 163
- 8) flow cast: KAYE + POWER, 1954, p. 309
- 9) flow roll: PEPPER et al., 1954,
fide POTTER + PETTIJOHN, 1977, p. 201
- 10) flow structure: COOPER, 1943, p. 190,
fide POTTER + PETTIJOHN, 1977, p. 201
- 11) intra-stratal flowage feature:
RICH 1950, p. 734
- 12) involution ball: SCHLUECHTER + KNECHT, 1979, p. 438
- 13) load ball: PETTIJOHN, POTTER + SIEVER, 1972, p. 123
- 14) load pouch: PETTIJOHN, POTTER + SIEVER, 1972, p. 123
- 15) pouch structure: ELLIOTT, 1965
- 16) pseudo-nodule: MACAR, 1951
- 17) quake sheet: KUENEN, 1958, p. 20
- 18) rolled-up pebble: HADDING, 1931,
fide DZULYNSKI + WALTON, 1965, p. 152
- 19) roller: VISHNER + CUNNINGHAM, 1981, p. 179
- 20) slump ball: DESTOMBES + JEANNETTE, 1955, pl. 1,
fide POTTER + PETTIJOHN, 1977, p. 201
- 21) storm roller: CHADWICK, 1931, p. 242,
fide POTTER + PETTIJOHN, 1977, p. 201
- 22) trail and underplight:
DEELEY, 1916, p. 3

b) convolutions

Définition: Déformations composées de plis d'axe vertical ou couché

- 1) convolute band: DZULYNSKI + WALTON, 1965, p. 181
- 2) convolute bedding: KUENEN, 1953, p. 1056
- 3) convolute folding: WILLIAMS, 1960, p. 210
- 4) convolute lamination: TEN HAAF, 1956, p. 188
- 5) convoluted bed: DZULYNSKI + WALTON, 1965, p. 181
- 6) convoluted laminae: SANDERS, 1960, p. 409
- 7) crenulated bedding: fide McKEE, REYNOLDS + BAKER, 1962, p. D152
- 8) crinkled bedding: MIGLIORINI, 1950,
fide DZULYNSKI + WALTON, 1965, p. 179
- 9) curled bedding: FEARNSIDES, 1910,
fide DZULYNSKI + WALTON, 1965, p. 179
- 10) current convolute lamination:
DZULYNSKI + SMITH, 1963, p. 616
- 11) intraformational folding:
FAIRBRIDGE, 1946, p. 61
- 12) intraformational recumbent fold:
McKEE et al., 1962
- 13) intrastratal contortion, intricate folding and crumpling:
RICH, 1950, p. 729
- 14) miniature plication: FAIRBRIDGE, 1946, p. 85
- 15) slip bedding: KSIAZKIEWICZ, 1949,
fide DZULYNSKI + WALTON, 1965, p. 179
- 16) evtl: wavy bedding: BOCACZ et al., 1968, p. 386

Allemand: fide EINSELE, 1963, p. 167

- 1) Gleitfaltung: RUECKLIN, 1953
- 2) Rutschfaltung: ZEIL, 1960
- 3) Rutschungswulst : KRAUS 1935
- 4) endostratische Sedifluktion:
RICHTER, 1952
- 5) Wicklungsstrukturen oder Wickelstrukturen:
KRAUS, 1935, und KNETSCH, 1960
- 6) Wulstbank: PLESSMANN, 1961

Remarque: La plupart des termes ci-dessus ont été appliqués au niveau limoneux C de la série de Bouma lors de la description de turbidite (cf: BLATT et al, 1980, p. 145)

c) Diapir

Définition: Déformation en forme d'anticlinal

- 1) air heave structure: STEWART, 1956, p. 155
- 2) flame structure: WALTON, 1956, fide SULLWOLD, 1960, p. 635
- 3) gas heave structure: COLEMAN + GAGLIANO, 1965, p. 136
- 4) mudlump: READING, 1978, p. 139
- 5) streamer: SELLEY et al, 1963, p. 235

d) Dish

Définition: déformation en forme de coupe

- 1) cusp structure: SELLEY et al., 1963, p. 235
 - 2) point-up structure: SELLEY et al., 1963, p. 235
 - 3) water escape structure: LOWE, 1975, p. 157
- } ébauche de dish

e) Irregular contortions

Définition: déformations à la géométrie quelconque, non réglée

- 1) corrugated lamination: DAVIES, 1965, p. 309
- 2) irregular contorted bed: McKEE et al, 1962, p. D152
- 3) shredded bedding: ELLIOTT, 1965, p. 194

f) Pillar

Définition: intrusion en forme de colonne (LOWE, 1975, p. 169)

- 1) clastic intrusion: ELLIOTT, 1965, p. 194
- 2) streamer: SELLEY et at., 1963, p. 235 (ébauche de pillar)
- 3) stress pillar: LOWE, 1975, p. 173 (pillar cisailé par plans horizontaux)

Remarque: Il faut rapprocher de ce type de déformations les dykes sédimentaires de REINECK + SINGH, 1980, p. 58.

g) Pocket

Définition: déformation en forme de poche (SULLWOLD, 1960, p. 635)

- 1) air heave structure: STEWART, 1956, p. 155
- 2) asymmetrical load cast: BRENCHLEY + NEWALL, 1977, p. 826
- 3) convolute bedding: WUNDERLICH, 1967, p. 346
- 4) convolute laminae: DZULYNSKI + SMITH, 1963, p. 626
- 5) flow roll: RICH, 1950, p. 725 (associé à flute cast)
- 6) inter-stratal flowage feature:
RICH, 1950, p. 739
- 7) load cast: KUENEN, 1953, p. 1058
- 8) load casted bed: BRENCHLEY + NEWALL, 1977, p. 820
- 9) load pocket: PETTIJOHN, 1975, p. 120
- 10) load structure: REINECK + SINGH, 1973, p. 84

Allemand:

- 1) Belastungsmarke PLESSMANN, 1961, p. 523
- 2) Fliesswulst: FUCHS, 1895, p. 371,
fide PLESSMANN, 1961, p. 523

Annexe 5

Delta de Granges

Dossier photographique

Dossier photographique (Delta de Granges)



Fig. 65

Photo a : Panorama de la gravière de Granges

- a: niveaux déformés des top-sets
- b: paquets glissés de top-sets
- c: fore-sets

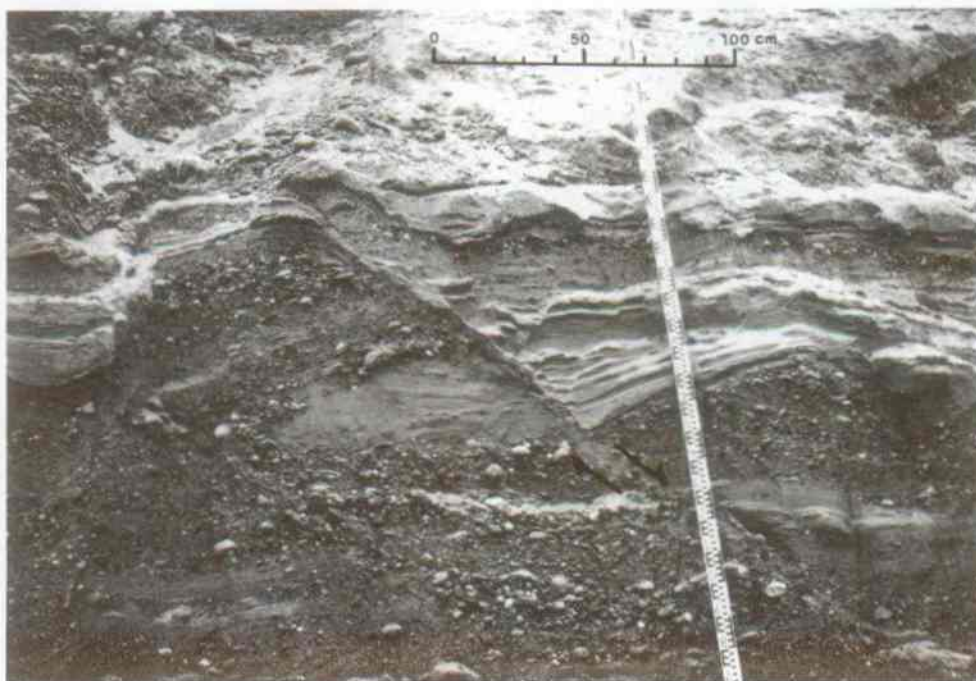


Fig. 66

Photo b : Tectonique synsédimentaire dans les fore-sets



Fig. 67

Photo c : Aspect chaotique des déformations



Fig. 68

Photo d : Ball-and-pillow



Fig. 69

Photo e : Diapir de sable et dish structures

a: sable b: limon c: galets mous (marne aquitanienne)

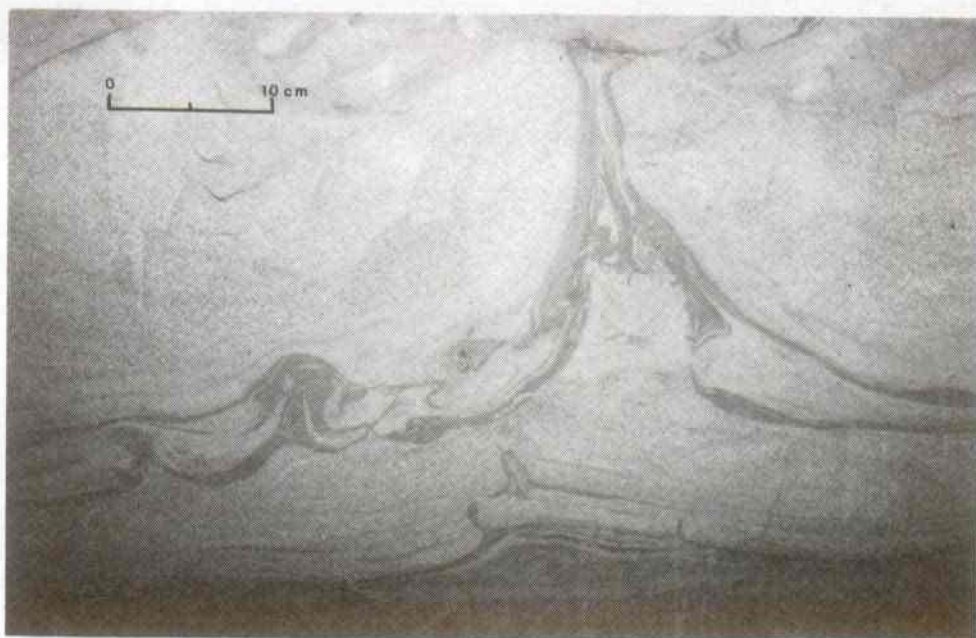


Fig. 70

Photo f: Diapir de limon

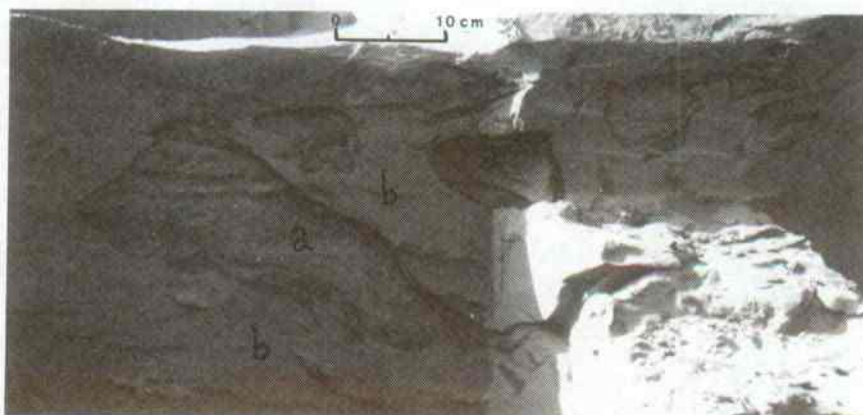


Fig. 71

Photo g : Ball-and-pillow a: sable b: limon

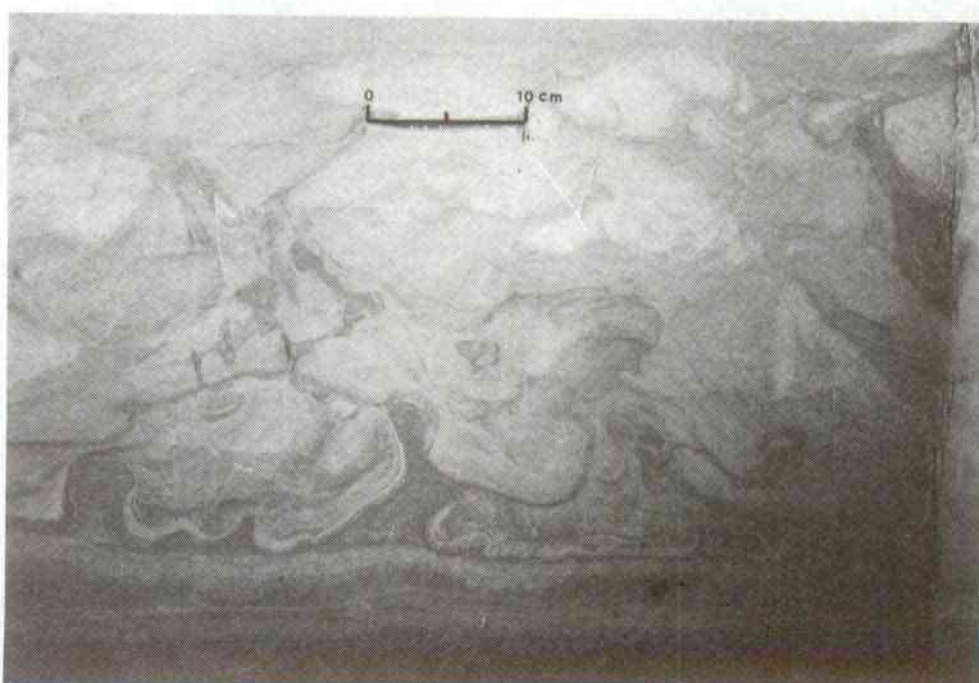


Fig. 72

Photo h : Irregular contortions (coupe sériée)



Fig. 73

Photo i : Irregular contortions (coupe s rie e)



Fig. 74

Photo j : Irregular contortions (coupe s rie e)

Espacement des coupes: un centim tre

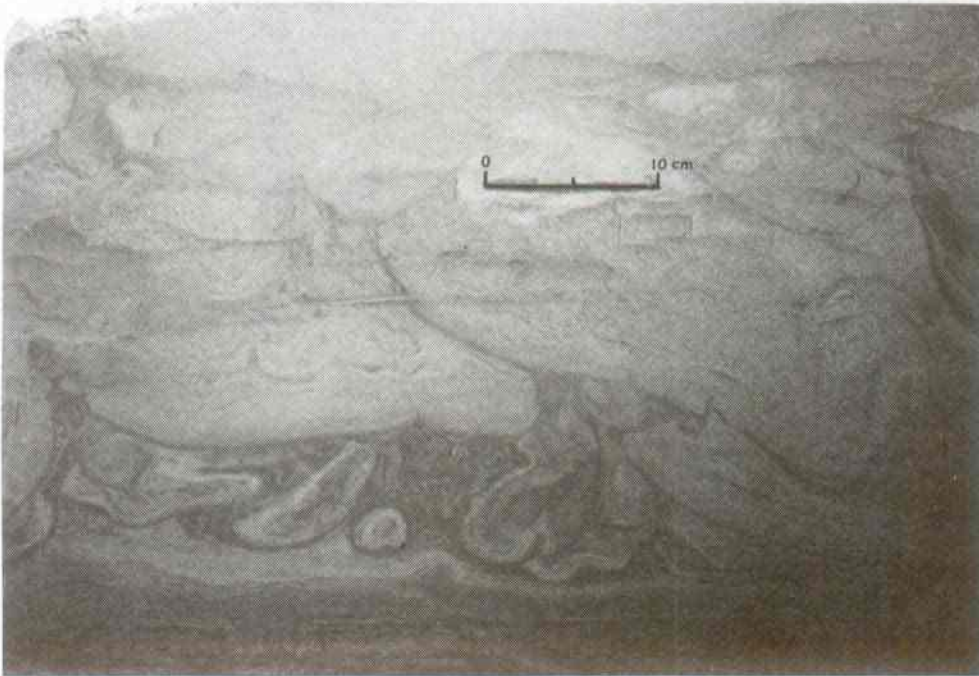


Fig. 75

Photo k : Irregular contortions (coupe s rie e)

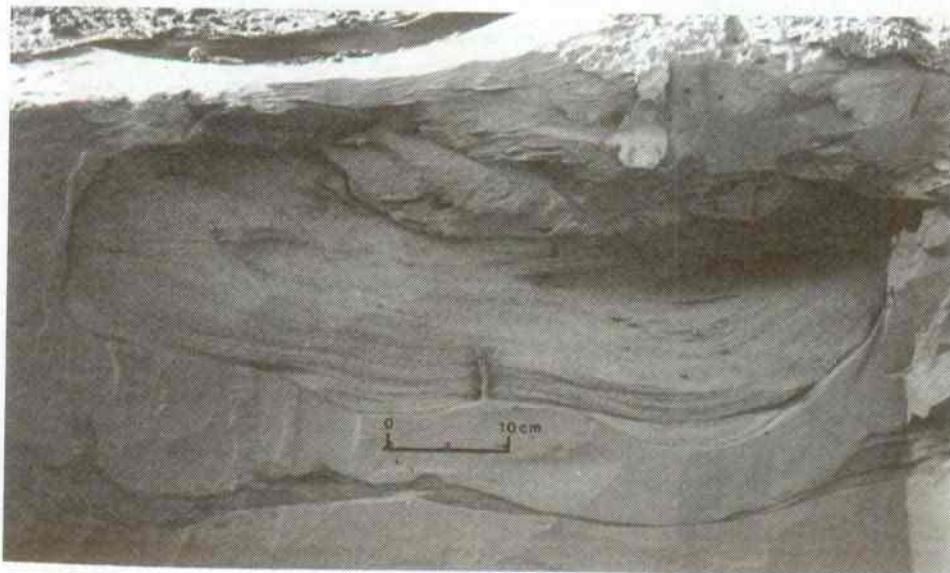


Fig. 76

Photo l : Ball-and-pillow et pillar de limon

Delta de Granges: top-sets

Fig. 78



Photo n: Diapir et pocket de limon

Fig. 77

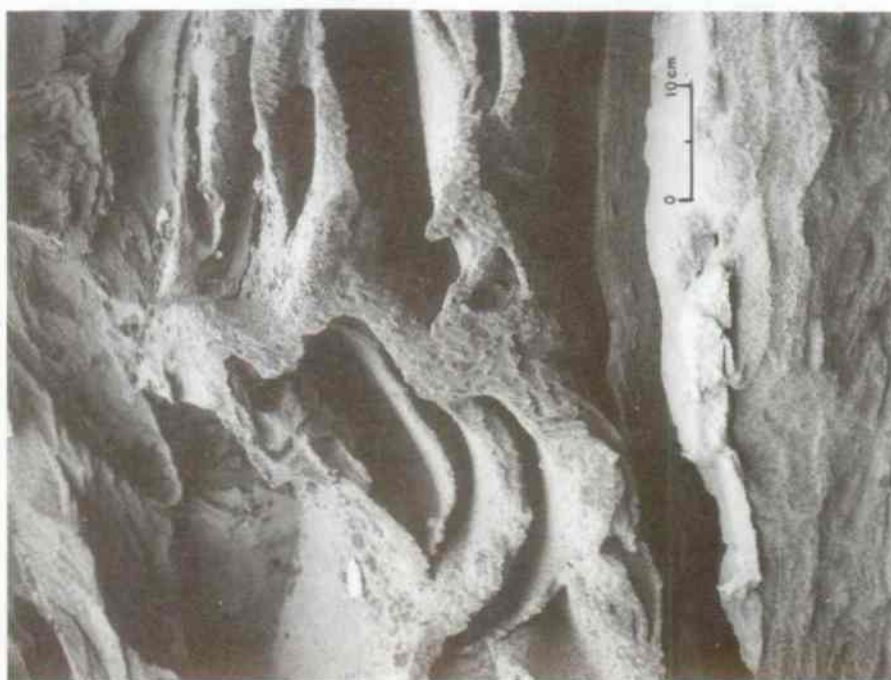


Photo m: Dish et diapir de limon

NB: Un important dossier photographique est disponible au Laboratoire de Géologie de l'EPFL (voir aussi PARRIAUX 1972, p. 427-432)

Annexe 6

Essais en laboratoire sur les sédiments de Granges

| | |
|---|-----|
| 6.1 Analyses chimiques | 158 |
| 6.2 Poids volumique apparent sec minimum | 159 |
| 6.3 Calcul du coefficient de perméabilité verticale à partir de γ_{dmin} | 164 |
| 6.4 Perméamètre à charge variable | 167 |
| 6.5 Essais oedométriques | 168 |
| 6.6 Essais triaxiaux standards | 177 |
| 6.7 Essais triaxiaux dynamiques | 179 |
| 6.8 Table vibrante | 192 |

6.1. ANALYSES CHIMIQUES

6.1.1. Destruction des carbonates

Traitement classique à l'acide chlorhydrique 6N et lavage du résidu à l'eau bidistillée.

6.1.2. Destruction des phyllosilicates et des oxydes (magnétite etc.)

20 ml d'acide nitrique (HNO_3) et 20 ml d'acide sulfurique (H_2SO_4) sont versés sur l'échantillon (5 g). Le mélange est porté à ébullition. Puis l'échantillon est lavé. le traitement est refait à deux reprises. En fin d'opération, l'échantillon est lavé soigneusement. 1 à 2% des feldspaths sont détruits par ce traitement.

6.1.3. Destruction du quartz

60 ml d'acide borofluorhydrique concentré (HBF_4) sont versés sur l'échantillon sec et chauffés à petit feu pendant 10 minutes. Puis on laisse agir l'acide pendant 12 heures. L'échantillon est alors soigneusement rincé à l'eau bidistillée.

Le reliquat est constitué de feldspaths et de ferromagnésiens.

6.1.4. Remarque

L'acide fluorhydrique (HF) détruit tous les silicates (feldspaths, ferromagnésiens, quartz).

6.2. POIDS VOLUMIQUE APPARENT SEC MINIMUM

Par décantation, nous avons obtenu le poids volumique apparent sec minimum. De ces essais, nous avons cherché à tirer:

- une relation entre γ_d et la hauteur de sédiments décantés
- l'apport de sédiment minimum pour créer spontanément des pillars,
- la perméabilité verticale minimum associée à la formation des pillars,
- une équation liant la pression à la base du dépôt à l'indice de vide (résultats présentés sous 5.3 : Essais oedométriques).

6.2.1. DETERMINATION DES VALEURS MOYENNES

(Echantillons saturés)

A. Matériel

Colonnes graduées en verre Witeg (diamètres intérieurs: 15 à 600 mm).

L'eau est rendue alcaline par quelques millilitres de NaOH.

B. Procédure

L'échantillon de poids connu est agité dans la colonne pleine d'eau jusqu'à ce que la suspension soit homogène. Puis la colonne est déposée. La lecture du volume se fait à 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180 minutes et à 5 jours.

C. Calcul

Le poids volumique apparent sec moyen est calculé par la relation:

$$\gamma_{dmin} = \frac{\text{poids sec}}{\text{volume}} = (\text{kN/m}^3)$$

D. Remarque

Grâce au scintillomètre γ - γ de l'Institut du Génie Rural, on a mis en évidence que le poids volumique apparent sec des sables varie quasiment avec la hauteur de la couche, puis γ_d devient constant au-delà des 20 premiers centimètres.

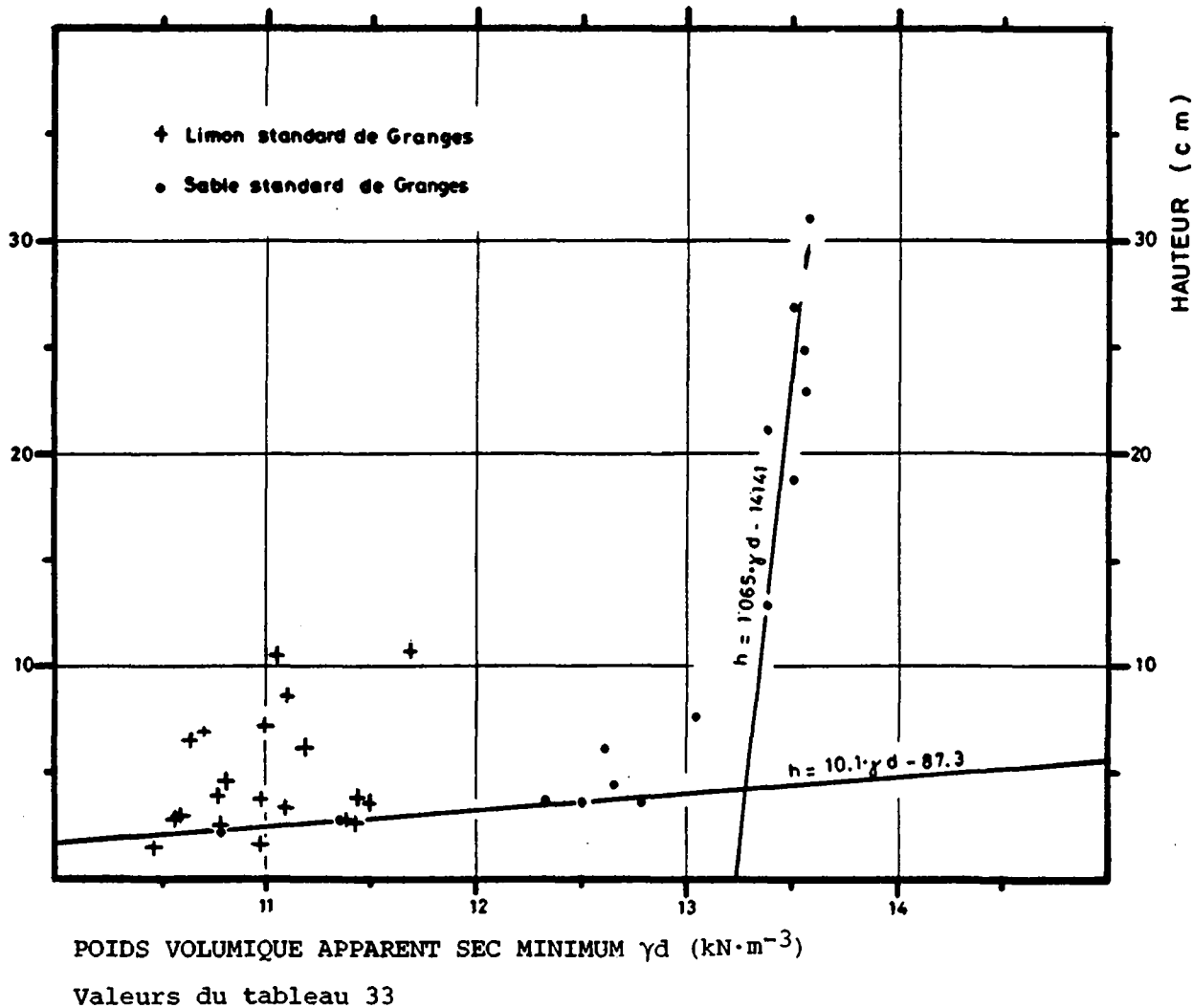


Fig. 79: Poids volumique apparent sec en fonction de la hauteur de la colonne de sédiments.

Tableau 33: Poids volumique apparent sec minimum (échantillons saturés)

$T_{\text{eau}} = 20^{\circ}\text{C}$

| | Poids (g) | Volume (cm ³) | Hauteur (mm) | $\gamma_d \text{ min}$ (kNm ⁻³) | Indice de vide e (-) |
|-----------------------|--------------|------------------------------|-----------------|--|----------------------------|
| sable standard saturé | 74.8 | 68 | 22.9 | 10.79 | 1.43 |
| | 95.1 | 82 | 27.6 | 11.37 | 1.31 |
| | 137.9 | 108 | 36.4 | 12.52 | 1.09 |
| | 140.8 | 108 | 36.4 | 12.79 | 1.05 |
| | 139.7 | 111 | 37.4 | 12.34 | 1.12 |
| | 170.5 | 132 | 44.5 | 12.67 | 1.07 |
| | 235.4 | 183 | 61.7 | 12.62 | 1.08 |
| | 303.5 | 228 | 76.8 | 13.05 | 1.01 |
| | 304.9 | 229 | 77.2 | 13.06 | 1.01 |
| | 528.6 | 387 | 130.4 | 13.40 | 0.96 |
| | 730.1 | 529.5 | 188.9 | 13.52 | 0.94 |
| | 859.0 | 629 | 212.0 | 13.39 | 0.96 |
| | 940.6 | 680 | 229.2 | 13.57 | 0.93 |
| | 1023.1 | 740 | 249.4 | 13.56 | 0.93 |
| | 1105.6 | 802 | 270.3 | 13.52 | 0.94 |
| | 1323.2 | 955.5 | 322.1 | 13.58 | 0.93 |
| | 5835 | 423.5 | 668.0 | 13.51 | 0.94 |
| limon standard saturé | 5.88 | 5.5 | 14.5 | 10.48 | 1.52 |
| | 6.768 | 6.05 | 15.8 | 10.97 | 1.41 |
| | 9.377 | 8.7 | 21.7 | 10.57 | 1.50 |
| | 9.91 | 9.0 | 22.4 | 10.80 | 1.44 |
| | 12.58 | 10.8 | 26.3 | 11.42 | 1.31 |
| | 11.952 | 11.05 | 28.5 | 10.61 | 1.49 |
| | 6.902 | 6.1 | 33.6 | 11.10 | 1.38 |
| | 6.902 | 6.45 | 35.6 | 10.49 | 1.52 |
| | 6.927 | 14.4 | 36.3 | 11.49 | 1.30 |
| | 16.927 | 14.5 | 37.1 | 11.45 | 1.30 |
| | 16.300 | 14.6 | 37.7 | 10.96 | 1.41 |
| | 7.99 | 7.0 | 38.6 | 11.19 | 1.36 |
| | 29.48 | 26.7 | 46.8 | 10.83 | 1.44 |
| | 12.325 | 10.8 | 62.3 | 11.19 | 1.36 |
| | 12.325 | 11.35 | 65.5 | 10.65 | 1.48 |
| | 43.11 | 39.5 | 69.3 | 10.70 | 1.47 |
| | 31.40 | 28.0 | 72.3 | 11.00 | 1.40 |
| | •56.04 | 49.5 | 86.8 | 11.10 | 1.38 |
| | •67.66 | 60.0 | 105.3 | 11.06 | 1.39 |
| | •72.56 | 60.8 | 106.7 | 11.70 | 1.26 |

• : présence de pillars

sable $\gamma_s = 26.213 \text{ kNm}^{-3}$

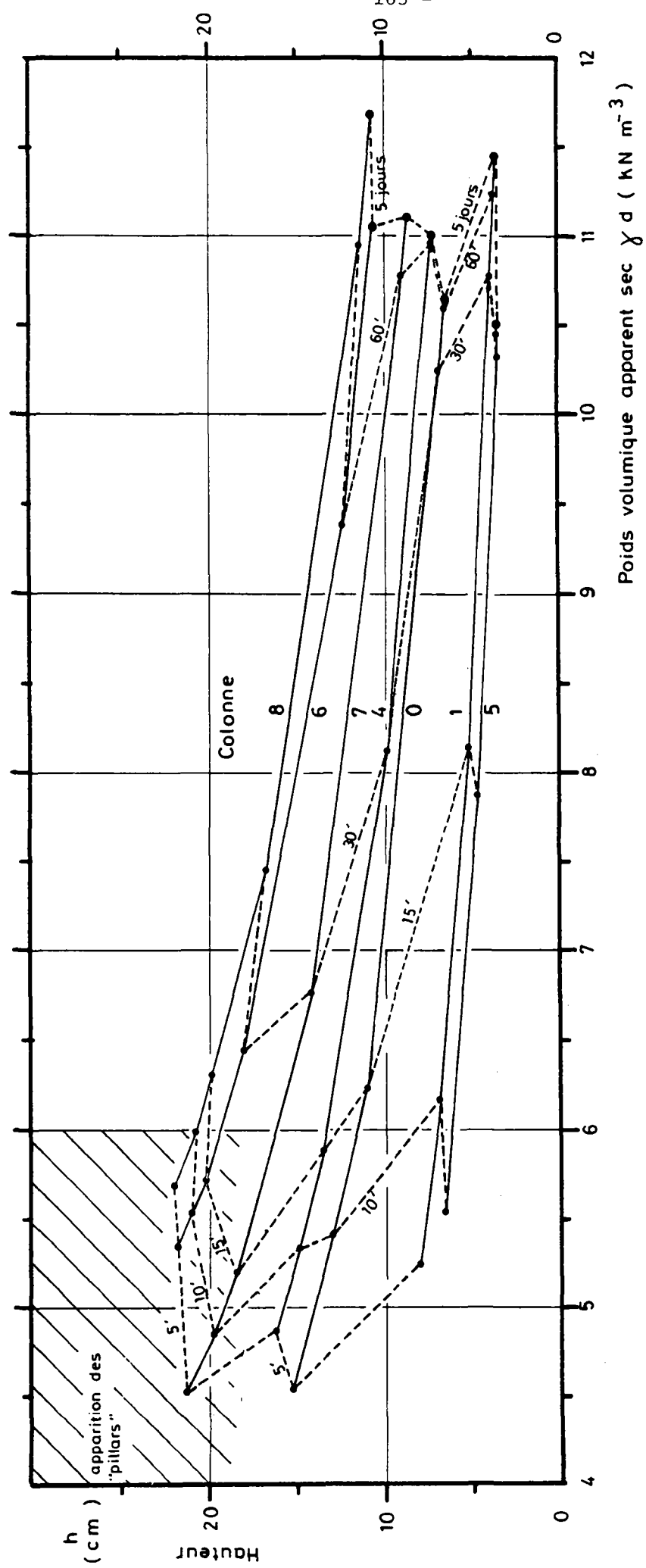
limon $\gamma_s = 26.386 \text{ kNm}^{-3}$

Tableau 34 Poids volumique apparent sec du limon standard
en fonction du temps (échantillons saturés)

$T = 20^{\circ}\text{C}$

| Colonne | Poids échantillon | | | | Colonne | Poids échantillon | | | |
|---------|-------------------|-------|------------|------|-----------------|-------------------|------------|------|--|
| 0 | 12.325 g | | | | 5 | 6.902 g | | | |
| 1 | 16.927 g | | | | 6 | 67.66 g | | | |
| 4 | 31.40 g | | | | 7 | 56.04 g | | | |
| | | | | | 8 | 72.56 g | | | |
| colonne | t = 5 minutes | | | | t = 10 minutes | | | | |
| | V | h | γ_d | e | V | h | γ_d | e | |
| 0 | 26.3 | 153 | 4.56 | 4.79 | 22.3 | 129 | 5.42 | 3.87 | |
| 1 | 31.6 | 81 | 5.25 | 3.45 | 26.9 | 69 | 6.17 | 3.28 | |
| 4 | 63.2 | 163 | 4.88 | 3.79 | 57.6 | 148.8 | 5.34 | 3.94 | |
| 5 | flou | - | - | - | 12.2 | 67.3 | 5.55 | 3.75 | |
| 6 | • 124.2 | 218 | 5.34 | 3.94 | • 119.7 | 210 | 5.54 | 3.76 | |
| 7 | • 121.6 | 213.4 | 4.52 | 4.84 | • 113.2 | 198.6 | 4.85 | 4.44 | |
| 8 | • 124.8 | 219 | 5.70 | 3.63 | • 118.6 | 208 | 6.00 | 3.40 | |
| colonne | t = 15 minutes | | | | t = 30 minutes | | | | |
| | V | h | γ_d | e | V | h | γ_d | e | |
| 0 | 19.4 | 112 | 6.23 | 3.23 | 11.8 | 68 | 10.24 | 1.58 | |
| 1 | 20.4 | 52.2 | 8.14 | 2.24 | 15.4 | 39.4 | 10.78 | 1.45 | |
| 4 | 52.3 | 135 | 5.89 | 3.48 | 37.9 | 97.9 | 8.13 | 2.25 | |
| 5 | 8.6 | 47.4 | 7.87 | 2.35 | 6.55 | 36.1 | 10.33 | 1.55 | |
| 6 | 115.7 | 203 | 5.73 | 3.60 | 102.8 | 180.4 | 6.45 | 3.09 | |
| 7 | 105.4 | 184.9 | 5.21 | 4.06 | 81.0 | 142.1 | 6.78 | 2.89 | |
| 8 | 112.9 | 198 | 6.31 | 3.18 | 95.5 | 167.6 | 7.45 | 2.54 | |
| colonne | t = 60 minutes | | | | t = 120 minutes | | | | |
| | V | h | γ_d | e | V | h | γ_d | e | |
| 0 | - | - | - | - | 11.4 | 65.8 | 10.60 | 1.49 | |
| 1 | 14.8 | 37.8 | 11.22 | 1.35 | 14.6 | 37.4 | 11.37 | 1.32 | |
| 4 | 28.1 | 72.6 | 10.96 | 1.41 | 28.0 | 72.3 | 11.00 | 1.40 | |
| 5 | 6.48 | 35.7 | 10.45 | 1.52 | 6.48 | 35.7 | 10.45 | 1.52 | |
| 6 | 70.7 | 124.0 | 9.39 | 1.81 | 6.07 | 106.5 | 10.93 | 1.41 | |
| 7 | 51.0 | 89.5 | 10.78 | 1.45 | 49.8 | 87.4 | 11.04 | 1.39 | |
| 8 | 65 | 114.0 | 10.95 | 1.41 | - | - | - | - | |
| colonne | t = 180 minutes | | | | t = 5 jours | | | | |
| | V | h | γ_d | e | V | h | γ_d | e | |
| 0 | 11.35 | 65.5 | 10.65 | 1.48 | 11.35 | 65.5 | 10.65 | 1.48 | |
| 1 | 14.5 | 37.1 | 11.45 | 1.30 | 14.5 | 37.1 | 11.45 | 1.30 | |
| 4 | 28.0 | 72.3 | 11.00 | 1.40 | 28.0 | 72.3 | 11.0 | 1.40 | |
| 5 | 6.45 | 35.6 | 10.49 | 1.52 | 6.45 | 35.6 | 10.49 | 1.52 | |
| 6 | 60.0 | 105.3 | 11.06 | 1.39 | 60.0 | 105.3 | 11.06 | 1.39 | |
| 7 | 49.5 | 86.8 | 11.10 | 1.38 | 49.5 | 86.8 | 11.10 | 1.38 | |
| 8 | 60.8 | 106.7 | 11.70 | 1.26 | 60.8 | 106.7 | 11.70 | 1.26 | |

V = volume de l'échantillon (cm^3)
 h = hauteur de l'échantillon (mm)
 γ_d = poids volumique apparent sec (kNm^{-3})
 e = indice de vide (-)
 $\gamma_s = 26.386 \text{ kNm}^{-3}$
 • : formation de pillars



h : hauteur de la colonne de boue

Fig. 80 : Hauteur de décantation en fonction du temps (limon standard)

6.2.2. Conclusions concernant les essais de décantation

A. Sables standards

- En-dessous de $\gamma_d = 13 \text{ kNm}^{-3}$, la hauteur de sédiments h est liée à γ_d par l'équation: $h = (10,1 \cdot \gamma_d) - 87,3$ (h en cm)
Au-delà de 13 kNm^{-3} : $h = (1,065 \cdot \gamma_d) - 1414$ (h en cm)

La densité du sédiment croît très lentement dès que le dépôt dépasse 10 centimètres.

- Les pillars ne sont pas formés spontanément même pour des apports rapides dépassant 66 cm.

B. Limons standards

- Le poids volumique apparent sec est compris entre $10,5$ et $11,7 \text{ kNm}^{-3}$ pour les dépôts de 14 à 107 mm. Il n'existe pas de relation univoque entre γ_d et la hauteur.
- Les pillars sont apparus spontanément dès que la hauteur de dépôt dépasse 11 cm en 10 minutes.

6.3. Calcul du coefficient de perméabilité verticale à partir des essais sur le poids volumique apparent sec minimum γ_{min}

A. Observation

Des pillars se sont créés spontanément lors de la décantation du limon standard.

B. Hypothèse

L'écoulement est laminaire (loi de Darcy valable).

C. Critère

La vitesse de chargement $\dot{\sigma}'$ au bas de la colonne correspond à la mise en bouillonnante du limon. La vitesse de fluidisation v est atteinte.

$$\dot{\sigma}' = v \cdot \gamma_w, \quad \text{où } \dot{\sigma}' = \frac{\Delta \sigma'}{\Delta t}$$

avec $\Delta \sigma' =$ accroissement de la contrainte effective

$\Delta t =$ incrément de temps

$$\Delta \sigma' = (\gamma' l - \gamma' o) \text{ hm}$$

$\gamma' l =$ poids volumique apparent déjaugé au temps t_l

$\gamma' o =$ poids volumique apparent déjaugé au temps t_o

$\gamma_d =$ poids volumique apparent sec

$\text{hm} =$ hauteur moyenne de la colonne de décantation $= (h_l + h_o) \frac{1}{2}$

$h_l =$ hauteur de la colonne de décantation au temps t_l

$h_o =$ hauteur de la colonne de décantation au temps t_o

$$\text{Comme } \gamma' l = \gamma_{dl} + \left(\frac{\gamma_s - \gamma_{dl}}{\gamma_s} \right) \cdot \gamma_w - \gamma_w$$

$$\text{donc } \Delta \sigma' = (\gamma_{dl} - \gamma_{do}) \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right) \left(\frac{h_o + h_l}{2} \right)$$

où $\gamma_w =$ poids volumique de l'eau

$\gamma_s =$ poids volumique des particules solides

$$\text{et } \dot{\sigma}' = \frac{\Delta \sigma'}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (\gamma_{dl} - \gamma_{do}) \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right) \left(\frac{h_o + h_l}{2} \right)$$

La vitesse de fluidisation est définie comme suit (Harr 1981):

$$v = k \cdot i_{cr} = K \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{(\gamma' o + \gamma' l)}{2}$$

où $k =$ coefficient de perméabilité verticale

$i_{cr} =$ gradient hydraulique critique (définition voir annexe 7)

$$v = \frac{k}{2\gamma_w} (\gamma_{do} + \gamma_{dl}) \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right)$$

$$i_{cr} = \frac{1}{\gamma_w} \left(\frac{\gamma_{do} + \gamma_{dl}}{2} \right) \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right)$$

D'où l'on tire k :

$$k = \frac{\dot{\sigma}'}{i_{cr} \gamma_w} = \frac{(\gamma_{dl} - \gamma_{do})}{\Delta t (\gamma_{do} + \gamma_{dl})} (h_o + h_l)$$

Application numérique à partir des valeurs du tableau 34 p. 162.

| to = 5 minutes; t1 = 10 minutes | | | | |
|---------------------------------|-----------------------|----------|----------------------|----------------------|
| Colonne | $\frac{e_0 + e_1}{2}$ | i_{cr} | k (m/s) | v (m/s) |
| 0 | 4,33 | 0,32 | $8,10 \cdot 10^{-5}$ | $2,59 \cdot 10^{-5}$ |
| 1 | 3,36 | 0,37 | $4,03 \cdot 10^{-5}$ | $1,47 \cdot 10^{-5}$ |
| 4 | 3,86 | 0,33 | $4,68 \cdot 10^{-5}$ | $1,53 \cdot 10^{-5}$ |
| 6* | 3,85 | 0,35 | $2,62 \cdot 10^{-5}$ | $9,14 \cdot 10^{-6}$ |
| 7* | 4,64 | 0,30 | $4,84 \cdot 10^{-5}$ | $1,45 \cdot 10^{-5}$ |
| 8* | 3,51 | 0,37 | $3,65 \cdot 10^{-5}$ | $1,37 \cdot 10^{-5}$ |

* : formation de pillars

Tableau 35: Coefficients de perméabilité tirés des essais de décantation.

Au-delà de 10 minutes, le gradient hydraulique n'est probablement plus critique.

Ces valeurs sont incluses dans la fig 27 p. 59. Elles ont été ramenées à la température des essais au perméamètre à charge variable (T = 15°C) par la relation:

$$\frac{k_{15^\circ\text{C}}}{k_{20^\circ\text{C}}} = \frac{v_{20^\circ\text{C}}}{v_{15^\circ\text{C}}} = 0,881$$

où v = viscosité cinématique de l'eau

6.4. RÉSULTATS DES ESSAIS AU PERMÉAMÈTRE À CHARGE VARIABLE

| | γ_d (kNm ⁻³) | Indice de vide e (-) | k_{moyen} (m•s ⁻¹) | remarque |
|------------------------------|---|---|---|------------------------------|
| sable standard | 15,60 16,51 15,99 | 0,680 0,588 0,639 | $3,17 \cdot 10^{-5}$ $2,68 \cdot 10^{-5}$ $2,24 \cdot 10^{-5}$ | } compacté au pilon |
| limon sableux standard | 13,1-13,6 14,1-14,4 14,4 15,11 15,70 16,23 | 1,02-0,95 0,88-0,84 0,84 0,752 0,686 0,631 | $4,2 \cdot 10^{-7}$ $2,4 \cdot 10^{-7}$ $2,2 \cdot 10^{-7}$ $1,79 \cdot 10^{-7}$ $1,49 \cdot 10^{-7}$ $1,22 \cdot 10^{-7}$ | } compacté par vibrations |
| limon standard | 13,2-13,7 14,04 14,15 15,44 15,70 | 1,00-0,93 0,879 0,752 0,709 0,681 | $2,8 \cdot 10^{-7}$ $2,35 \cdot 10^{-7}$ $2,06 \cdot 10^{-7}$ $9,30 \cdot 10^{-8}$ $8,93 \cdot 10^{-8}$ | } compacté par vibrations |

Température de l'eau: 15°C

Les coefficients de variation (écart-type/moyenne) de k_v sont compris entre 10 et 34%.

Les résultats sont présentés sous forme graphique à la figure 27 p. 59.

Tableau 36: Résultats des essais au perméamètre à charge variable

6.5. ESSAIS OEDOMETRIQUES

Grâce aux essais oedométriques, nous déterminons:

- l'ordre de grandeur du coefficient de consolidation C_v ,
- le temps nécessaire pour la résorption des pressions interstitielles.

6.5.1. Préparation des échantillons

Les échantillons de sols ont été constitués par sédimentation dans l'eau, à l'intérieur de la bague de l'oedomètre. C'est pourquoi les indices de vide initiaux sont élevés (tableau 37 p. 170 et fig. 83 p. 173).

6.5.2. Estimation du temps pour 90% de consolidation primaire (t_{90})

$$t_{90} = \frac{0,848 \cdot H^2}{4 \cdot C_v} \quad (\text{méthode de Taylor: } \sqrt{t})$$

$$\text{où } C_v = \frac{k}{mv \cdot \gamma_w}$$

H_0 = hauteur de l'échantillon (ici: 15 mm)

Application à nos résultats:

Limon: Palier: $15-60 \text{ kNm}^{-2}$ ($500-1000 \text{ kNm}^{-2}$)

$$mv = \frac{\Delta e}{(1 + e_0) \Delta \sigma'} = \frac{0,723 - 0,675}{1,723 \cdot 45} = 6,19 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{kN}^{-1}$$

$$(3,78 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{kN}^{-1})$$

$$k = 10^{-7} \text{ m/s} \quad (4,4 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}) \quad (\text{valeurs tirées des essais au perméamètre})$$

$$C_v = \frac{10^{-7} \cdot 10^3}{0,619 \cdot 9,79} = 1,65 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (1,19 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$$

$$t_{90} = 2,9 \text{ s} \quad (0,4 \text{ s})$$

Au-delà de 3 secondes, les grains se réarrangent alors que les surpressions d'eau ont disparu. La consolidation secondaire commence.

6.5.3. Consolidation secondaire

La consolidation secondaire volumétrique est quantifiée par le coefficient

$$C = \frac{\Delta h}{H_0} \text{ par décade de } \lg \text{ (Lambe + Whitman 1968, p. 421).}$$

Nos sables et limons fluent très peu. C_α ne dépasse pas d'ordinaire 1‰. Mais comme le tassement secondaire débute très tôt, il peut atteindre un taux important (jusqu'à la moitié du tassement primaire, cf palier 500-2000 kNm^{-2} de la fig. 83 p. 173.

Il existe bien un fluage du bâti de mesure. Nous l'avons mis en évidence en chargeant une jauge de laiton à 125 kNm^{-2} . Dès la sixième heure, un "tassement" démarre pour atteindre $8 \mu\text{m}$ après 7 jours ($C_\alpha = 0,37\%$). Ce fluage n'a pratiquement pas d'incidence sur la valeur des indices de vide: seule la 4e décimale est affectée par un fluage de cet ordre de grandeur.

6.5.4. Présentation des résultats

Nous avons reporté sur les fig. 79 et 80 les résultats des essais de sédimentation grâce à la relation:

$$p' = \gamma' \cdot h = (\gamma_d + \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s} \cdot \gamma_w - \gamma_w) \cdot h$$

où p' = pression moyenne,

h = hauteur de la colonne de boue.

Rappelons que la contrainte verticale appliquée dans la cellule oedométrique correspond à la pression moyenne dans tout l'échantillon. Le rapport σ_3/σ_1 est égal à l'unité, à cause de la faible épaisseur de l'échantillon.

Le tableau 37 donne aussi les modules d'élasticité oedométrique E_{oed} :

$$E_{\text{oed}} = \frac{\Delta \sigma'}{\Delta e} (1 + e_0) = \frac{1}{m_v}$$

Tableau 37 : Résultats numériques des essais oedométriques (sédiments de Granges

| | indice de vide initial | palier (kNm ⁻²) | indice de vide | | E _{oed} (MNm ⁻²) |
|------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------|--|
| | | | t = 1 minute | fin de l'essai | |
| sable standard | 0,883 | 0- 125 | 0,756 | 0,751 | 1,8 |
| | 0,772 | 0- 1 | 0,742 | 0,740 | - |
| | | 1- 15 | 0,720 | 0,717 | 1,1 |
| | | 15- 60 | 0,703 | 0,699 | 4,3 |
| | | 60- 125 | 0,692 | 0,689 | 11,0 |
| | | 125- 250 | 0,681 | 0,676 | 16,2 |
| | | 250- 500 | 0,668 | 0,662 | 29,9 |
| | | 500-1000 | 0,652 | 0,646 | 51,9 |
| | | 1000- 500 | 0,650 | 0,651 | - |
| | | 500- 250 | 0,654 | 0,655 | - |
| | | 250- 125 | 0,658 | 0,659 | - |
| | | 125- 60 | 0,662 | 0,663 | - |
| | | 60- 15 | 0,667 | 0,669 | - |
| | | 15- 1 | 0,674 | 0,678 | - |
| limon sableux standard | 0,853 | 0- 1 | - | 0,685 | - |
| | | 1- 15 | 0,654 | 0,651 | 0,69 |
| | | 15- 60 | 0,630 | 0,624 | 2,7 |
| | | 60- 125 | 0,616 | 0,610 | 7,5 |
| | | 125- 250 | 0,600 | 0,594 | 12,6 |
| | | 250- 500 | 0,581 | 0,574 | 19,9 |
| | | 500-1000 | 0,557 | 0,548 | 30,3 |
| | | 1000- 500 | 0,552 | 0,552 | - |
| | | 500- 250 | 0,556 | 0,556 | - |
| | | 250- 125 | 0,560 | 0,561 | - |
| | | 125- 60 | 0,566 | 0,567 | - |
| | | 60- 15 | 0,573 | 0,575 | - |
| | | 15- 1 | 0,582 | 0,585 | - |
| | | | | | |
| limon standard | 0,842 | 0- 1 | 0,794 | 0,791 | - |
| | | 1- 15 | 0,732 | 0,723 | 0,37 |
| | | 15- 60 | 0,682 | 0,675 | 1,6 |
| | | 60- 15 | 0,678 | 0,678 | - |
| | | 15- 1 | 0,684 | 0,686 | - |
| | | 1- 15 | 0,680 | 0,679 | 3,4 |
| | | 15- 60 | 0,669 | 0,666 | 5,8 |
| | | 60- 125 | 0,651 | 0,646 | 5,4 |
| | | 125- 250 | 0,629 | 0,623 | 8,9 |
| | | 250- 125 | 0,625 | 0,625 | - |
| | | 125- 60 | 0,629 | 0,630 | - |
| | | 60- 15 | 0,635 | 0,636 | - |
| | | 15- 1 | 0,643 | 0,647 | - |
| | | 1- 15 | 0,641 | 0,640 | 3,3 |
| | | 15- 60 | 0,635 | 0,634 | 12,3 |
| | | 60- 125 | 0,628 | 0,626 | 13,3 |
| | | 125- 250 | 0,618 | 0,612 | 14,5 |
| | | 250- 500 | 0,596 | 0,587 | 16,1 |
| | | 500-1000 | 0,569 | 0,557 | 26,4 |
| | | 1000- 500 | 0,561 | 0,561 | - |
| | | 500- 250 | 0,565 | 0,566 | - |
| | | 250- 125 | 0,570 | 0,571 | - |
| | | 125- 60 | 0,575 | 0,576 | - |
| | | 60- 15 | 0,582 | 0,585 | - |
| | | 15- 1 | 0,592 | 0,596 | - |

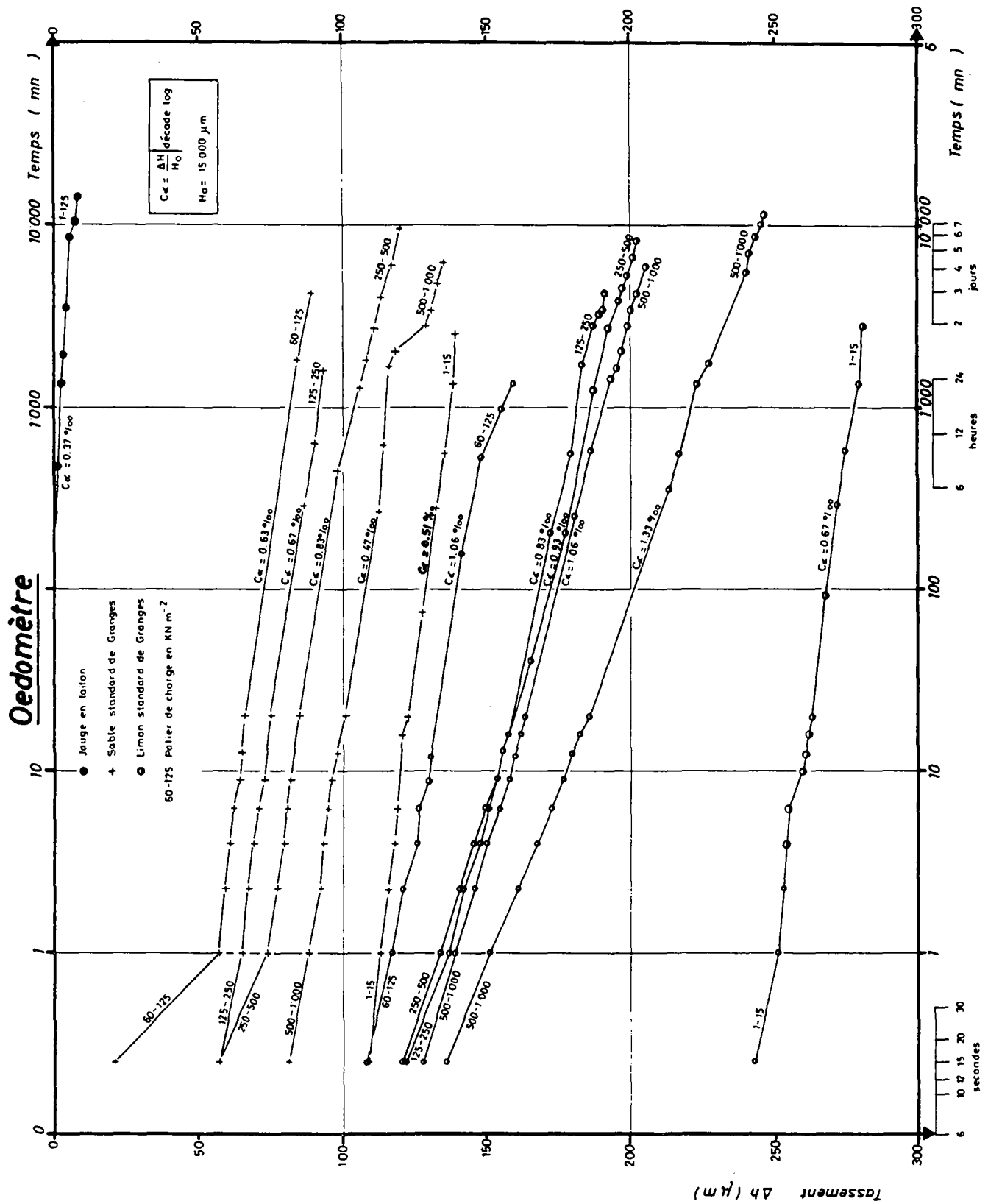


Fig. 8] : Essais oedométriques: tassements en fonction du temps

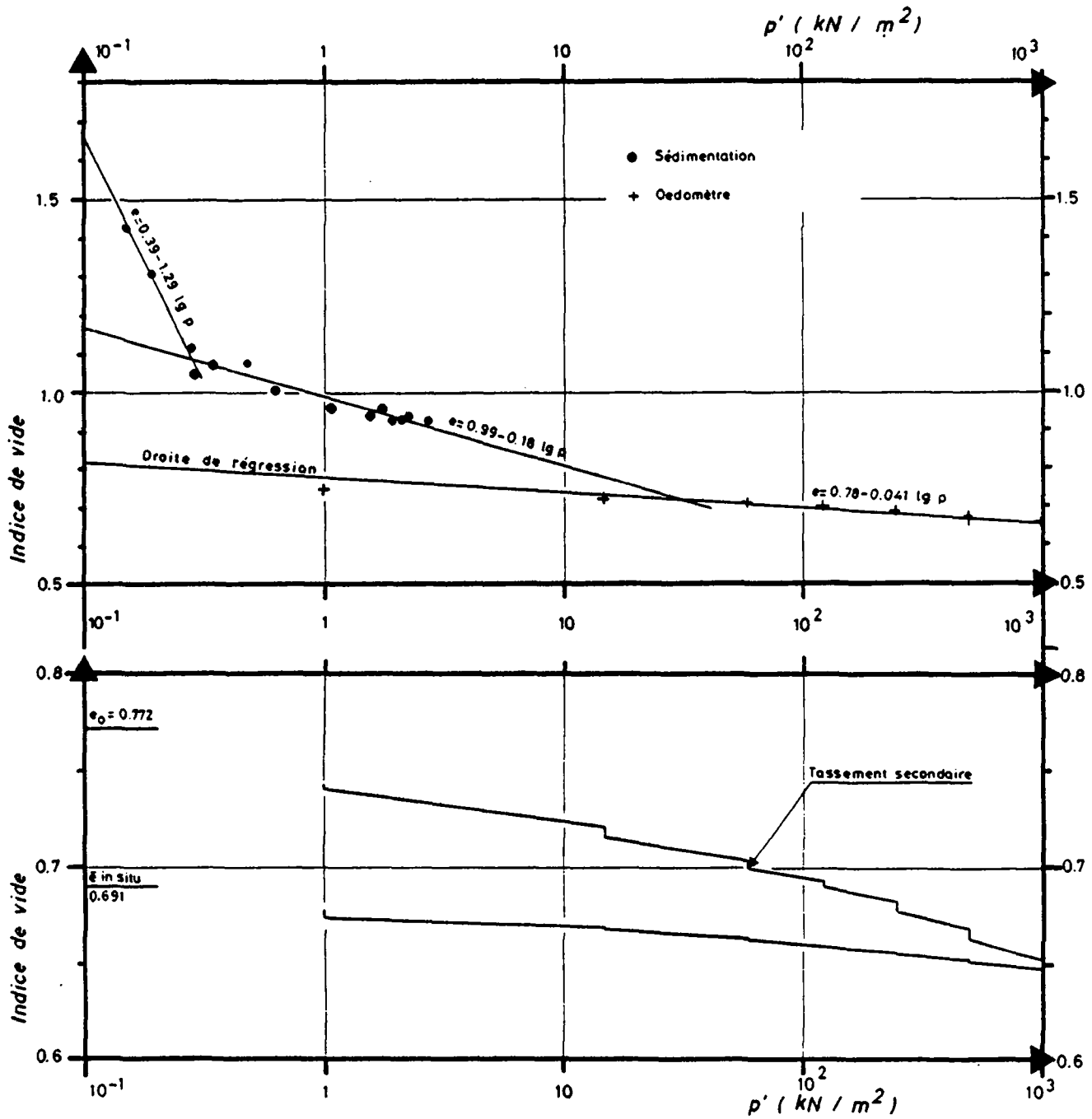


Fig.82: Courbe oedométrique du sable standard de Granges

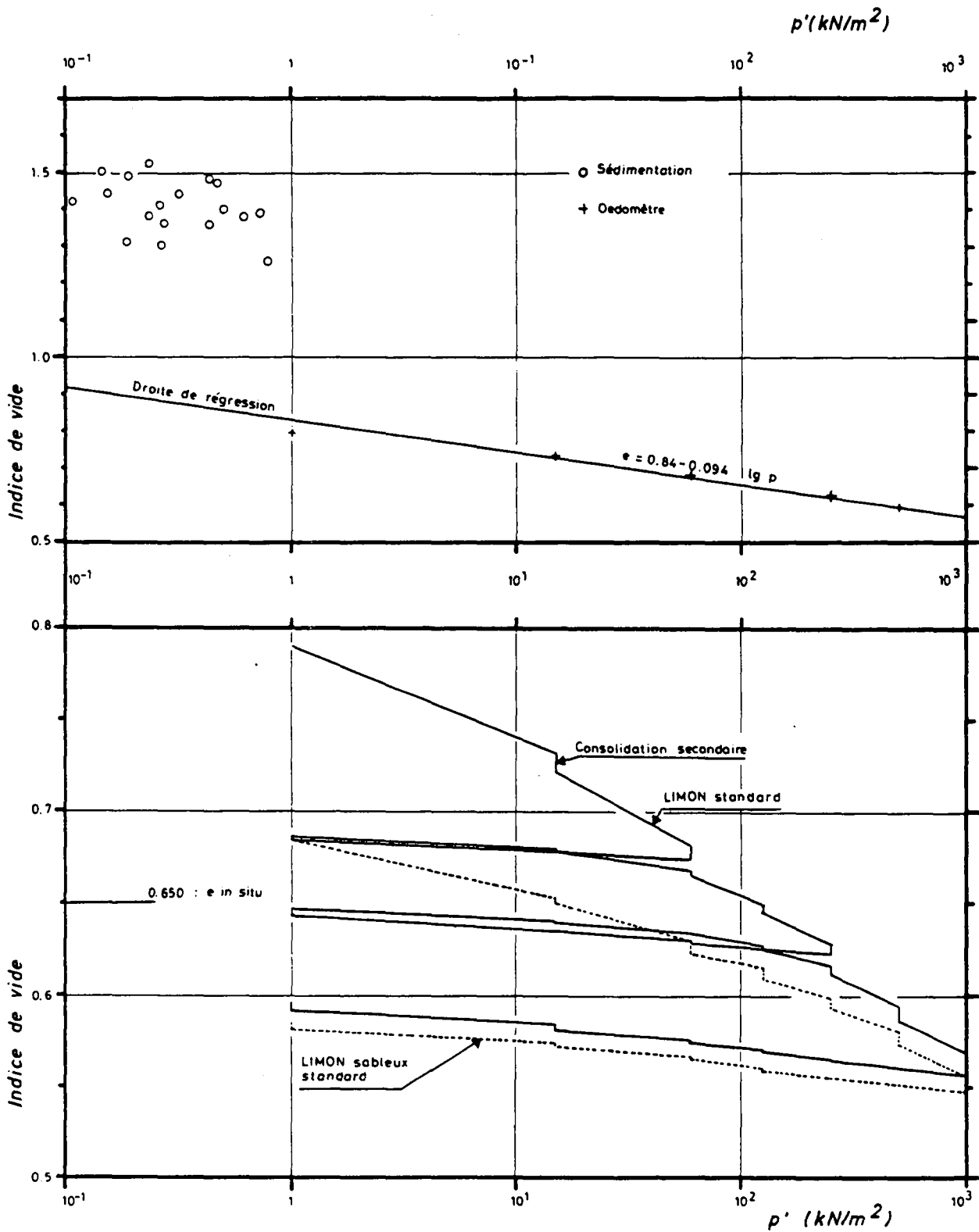


Fig. 83: Courbes oedométriques du limon standard de Granges

6.5.5. Analyse graphique des tassements selon ASAOKA

La construction graphique d'Asaoka est fondée sur l'équivalence entre la solution de l'équation différentielle du premier ordre

$$\Delta h + \frac{4H^2}{\pi^2 C_v} \frac{d\Delta h}{dt} = \Delta h_{\infty} \quad (\text{MAGNAN \& ROY 1980}) :$$

$$\frac{\Delta h(t)}{\Delta h_{\infty}} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp \left(\frac{-\pi^2 C_v}{4 H^2} T_v \right)$$

et l'approximation du premier ordre de la solution de l'équation différentielle de Terzaghi $C_v \frac{\delta^2 \Delta u}{\delta z^2} = \frac{\delta \Delta u}{\delta t}$:

$$\frac{\Delta h(t)}{\Delta h_{\infty}} = \frac{U}{100} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp \left(\frac{-\pi^2 C_v}{4 H^2} T_v \right)$$

Elle possède le précieux avantage de distinguer nettement les tassements primaire et secondaire (fig. 84 et 85). Cette approximation est valable pour les valeurs de T_v supérieures à 30%.

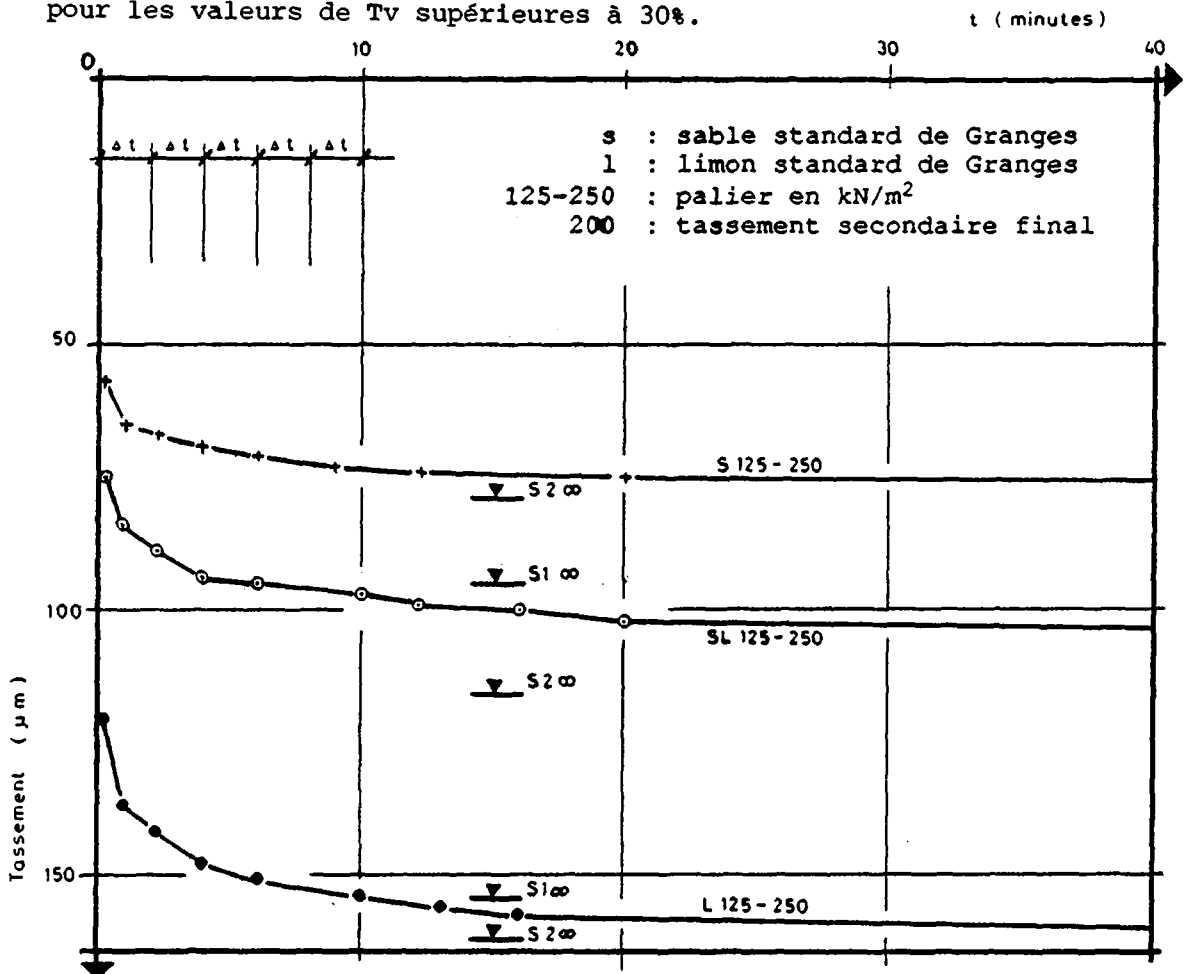
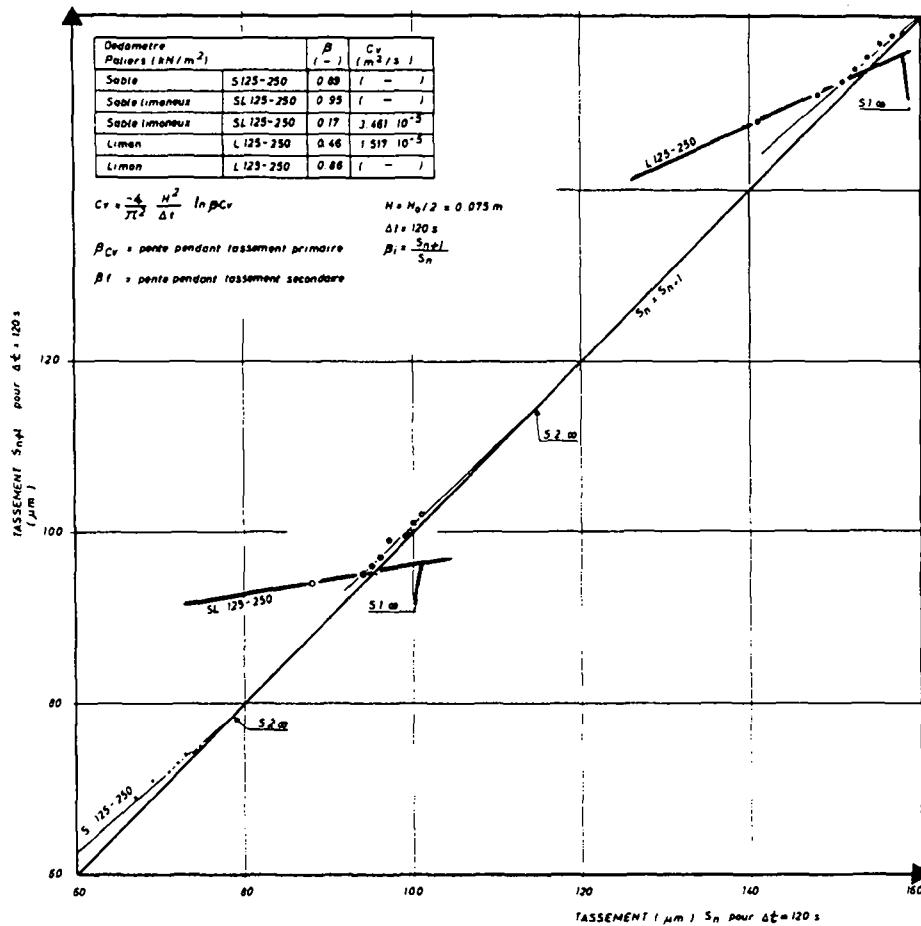


Figure 84: Construction d'Asaoka: tassements en fonction du temps.

Figure 85: Construction d'Asoaka: coefficients β et C_v



6.5.6. Conclusions concernant les essais oedométriques

A. Sables standards

- Les sables ont instantanément résorbé leur pression interstitielle. Le coefficient de consolidation obtenu par calcul avoisine $6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ($E_{oed} = 20 \text{ MN/m}^2$; $k = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$).
- La relation entre le logarithme de pression moyenne effective p' et l'indice de vide est linéaire en première approximation, par exemple pour p' supérieur à 50 kN/m^2 : $e = 0,78 - 0,041 \lg p'$ (p' en kN/m^2), où $0,041 \approx$ indice de compression C_c .
- L'indice de vide in situ ($e = 0,691$) correspond à une pression de 125 kN/m^2 , c'est-à-dire au poids de $5,5 \text{ m}$ de sable graveleux exondé ($\gamma = 22,5 \text{ kN/m}^3$); nos sols ne se trouvent donc pas dans un état surconsolidé.

- Le tassement secondaire est important en valeur absolue. Mais le coefficient C_α reste faible. Il ne dépasse pas 0,9 ‰. Il met en évidence le mode de constitution des échantillons. Les sols sédimentés dans la bague de l'oedomètre se réarrangent lentement en cours d'essai.

B. Limons standards

- Le coefficient de consolidation obtenu par calcul s'élève à $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le palier de charge 15-60 kN/m^2 et $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ pour l'étape 500-1000 kN/m^2 . Ces valeurs concordent avec celle qui résulte de la construction d'Asaoka (palier 125-250: $C_v = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$).
- L'équation liant l'indice de vide à la pression moyenne effective est formulée ainsi: $e = 0,84 - 0,094 \lg p'$ (p' en kN/m^2), où 0,094 = indice de compression C_c . Cette valeur se rapproche de celle qui a été proposée par Terzaghi et Peck 1948 pour les sols argileux remaniés (Lambe et Whitman 1969 p. 318):
$$C_c = 0,07 (W_L - 10) = 0,007 (22 - 10) = 0,084 \quad \text{où } W_L \text{ en } \%$$
- Les tassements secondaires dépassent légèrement ceux des sables avec un coefficient C_α compris entre 0,67 et 1,33 ‰.

6.6. ESSAIS TRIAXIAUX STANDARDS

Grâce à la cellule triaxiale, nous avons tenté de connaître les résistances au cisaillement lors d'essais non consolidés-non drainés (U-U), consolidés-non drainés (C-U) et consolidés-drainés (C-D).

Ces essais sont interprétés aussi dans le sens de l'"état critique" (POULOS et al. 1985 voir annexe 7.2 p.212).

6.6.1. Préparation des échantillons

Les sols humides ont été reconstitués dans les bagues de la cellule. Leur degré de saturation après consolidation est compris entre 80 et 89%. Les indices de vide traduisent avec des valeurs basses une contrainte de consolidation élevée par rapport à celui d'un dépôt fraîchement formé.

6.6.1. Commentaires sur les résultats

Essais non drainés (U-U et C-U)

Lorsque le limon n'est pas consolidé (U-U), il n'offre aucune résistance au cisaillement. Le sable en revanche conserve ses bonnes caractéristiques mécaniques.

Lors des essais C-U, le limon se comporte comme un sol sans cohésion avec un angle de frottement interne effectif supérieur à 30°.

Essai drainé (C-D)

Le sable se dilate fortement à la rupture; le coefficient de Poisson avoisine 0,9. Les valeurs de résistance au cisaillement nous semblent trop élevées. Nous pensons que l'air a joué un rôle non négligeable dans l'augmentation de la résistance.

Nous n'avons pas pu tester le domaine des faibles contraintes proches de celles qui règnent dans un dépôt fraîchement constitué.

Tableau 38 : Résultats des essais triaxiaux sur les sédiments de Granges

Diamètre initial: 55 mm

Hauteur initiale (avant consolidation) = 110 mm

| Conditions initiales | sable standard | | | | | limon standard | | | | |
|---|----------------|-------|-------|----------|-------|----------------|-------|-----------|-------|-----------|
| | U-U | | C-D | | | U-U | | C-U No. 1 | | |
| | | | | | | | | | | C-U No. 2 |
| Contrainte de consolidation (kNm^{-2}) | 0 | 0 | 50 | 100 | 150 | 0 | 0 | 50 | 100 | 150 |
| Teneur en eau (%) | 23,5 | 23,5 | 19,9 | 19,5 | 19,7 | 28,3 | 28,2 | 20,2 | 19,8 | 20,1 |
| Degré de saturation (%) | 86,5 | 87,1 | 80,8 | 80,5 | 80,9 | 85,8 | 85,9 | 84,9 | 80,8 | 81,6 |
| Indice de vide | 0,725 | 0,722 | 0,559 | 0,549 | 0,545 | 0,887 | 0,884 | 0,888 | 0,859 | 0,864 |
| Rupture: (σ'_1 / σ'_3) max. | | | | | | | | | | |
| Vitesse d'écrasement (mm/min) | | | | | | | | | | |
| σ_3 (kNm^{-2}) | 1,14 | 1,14 | 0,76 | 0,76 | 0,76 | 1,14 | 1,14 | 1,14 | 0,06 | 0,06 |
| σ_1 (kNm^{-2}) | 50 | 100 | 50 | 100 | 150 | 50 | 100 | 150 | 100 | 150 |
| σ'_3 (kNm^{-2}) | 299 | 396 | 404 | 688 | 973 | 60 | 112 | 166 | 306 | 385 |
| σ'_1 (kNm^{-2}) | 73 | 96 | 50 | 100 | 150 | 7 | 3 | 4 | 81 | 114 |
| Coefficient A de Skempton | 322 | 392 | 404 | 688 | 973 | 17 | 15 | 20 | 287 | 349 |
| E1 (%) | -0,09 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 4,33 | 7,84 | 8,95 | 0,09 | 0,15 |
| E3 (%) | 8,29 | 6,22 | 3,46 | 3,46 | 3,59 | 9,33 | 5,18 | 3,11 | 2,87 | 4,39 |
| E1 + E2 + E3 = $\Delta V/V$ (%) | -4,15 | -3,11 | -3,10 | -3,07 | -2,78 | -4,66 | -2,59 | -1,55 | -1,44 | -2,19 |
| Coefficient ν de Poisson (-) | 0 | 0 | -2,74 | -2,67 | -1,97 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0,5 | 0,5 | 0,90 | 0,89 | 0,77 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Résistance | | | | | | | | | | |
| Angle de frottement interne effectif ($^\circ$) | - | | | 45 | | 0 | | | 32 | 34 |
| Angle de frottement interne total ($^\circ$) | 35 | | | - | | 1,5 | | | 28 | 32 |
| Cohésion effective (kNm^{-2}) | - | | | 25 | | 0 | | | 0 | 0 |
| Cohésion totale (kNm^{-2}) | 25 | | | - | | 4 | | | 0 | 0 |
| Coefficient α de Drucker-Prager (-) | 0,235 | | | 0,352 | | 0 | | | 0,245 | 0,262 |
| Coefficient K de Drucker-Prager (kNm^{-2}) | 33,5 | | | 26,7 | | 0 | | | 0,4 | 0,8 |
| Qualité de l'ajustement de droite | mauvais | | | très bon | | mojen | | | mojen | bon |

E1 = Δh /hauteur de l'échantillon h (%)

E3 = ΔD /diamètre de l'échantillon D (%)

6.7. ESSAIS TRIAXIAUX DYNAMIQUES

L'"Institut für Grundbau und Bodenmechanik" de l'EPFZ possède une cellule triaxiale dynamique très performante qu'il a mise très gracieusement à notre disposition.

Par ces essais, nous voulions connaître le seuil de liquéfaction de nos sols pour des contraintes et indices de vide différents.

6.7.1. Préparation des échantillons

Les sables sont sédimentés à l'intérieur de la cellule remplie d'eau. Une fois l'échantillon recouvert de son capuchon, une dépression d'environ un mètre de colonne d'eau est créée dans le sol pour permettre le démontage de la coque de support. Puis la cellule est installée sous la presse. La procédure de "contre-pression" est alors appliquée pour mettre en solution l'air adsorbé (LOWE et JOHNSON 1960). Le facteur $B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1}$ tend ainsi vers l'unité.

6.7.2. Définitions des paramètres

A. Contraintes

- σ_1 = contrainte initiale appliquée par le piston de la cellule
 σ_3 = contrainte de confinement
 σ_v = contrainte verticale = $(P + \sigma_3 (F_e - F_p)) / F_e$
 P = force initiale appliquée par le piston (toujours supérieure à 0,4 kN pour la cellule de l'IGB)
 F_e = surface de l'échantillon (pour nos essais: 17440 mm²)
 F_p = surface de contact du piston sur le haut de l'échantillon (490 mm²)
 K_o = σ_3 / σ_v
 p = contrainte moyenne = $\frac{\sigma_v + 2\sigma_3}{3}$
 q = déviateur = $\sigma_v - \sigma_3 = \sigma_1$
 u = pression interstitielle initiale = contrainte de contre-pression (σ_b)
 p' = $p - u$
 $\Delta\sigma_v$ = $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$ = variation cyclique de contrainte verticale
 $\Delta\sigma_1$ = variation cyclique de contrainte appliquée par le piston (lue sur les diagrammes)
 Δp = $\frac{\Delta\sigma_v - 2\Delta\sigma_3}{3} = \frac{\Delta\sigma_1 - 3\Delta\sigma_3}{3}$
 Δu = variation cyclique de pression interstitielle (lue sur les diagrammes)
 $\Delta u_{r,m}$ = augmentation de la pression interstitielle après m cycles d'un palier $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$
 $\Delta u_{r,n}$ = augmentation de la pression interstitielle après n cycles de plusieurs paliers
 m = nombre de cycles d'un palier $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$
 Δq = $\Delta\sigma_v - \Delta\sigma_3 = \Delta\sigma_1 = 2\Delta\tau$

Remarque: $\Delta\sigma_1$ et $\Delta\sigma_3$ sont choisis pour que Δp soit proche de zéro. Ainsi les variations de pressions interstitielles correspondent approximativement à celles des contraintes moyennes effectives ($|\Delta u| \approx |\Delta p'|$).

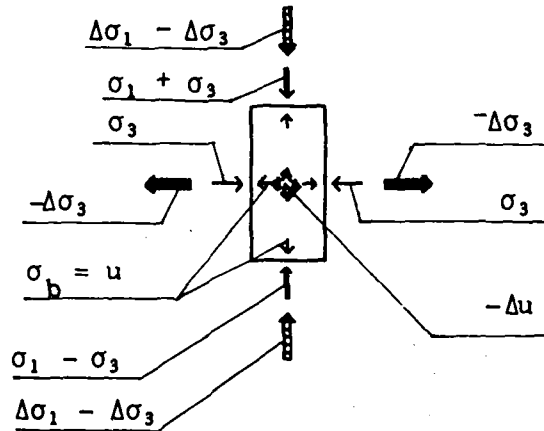


Fig.86: Contraintes totales et pressions interstitielles dans la cellule triaxiale dynamique.

Coefficients de Skempton

$$-\Delta u = -B \cdot \Delta\sigma_3 + A \cdot \Delta\sigma_1$$

$$A = \frac{-\Delta u + B \cdot \Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1}$$

Au début d'un nouveau palier $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$:

$$\sigma'_{1 \max} = \sigma_v - \sigma_b + \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3 + \Delta u - \Delta u_{r,n}$$

$$\sigma'_{3 \max} = \sigma_3 - \sigma_b - \Delta\sigma_3 + \Delta u - \Delta u_{r,n}$$

$$\sigma'_{1 \min} = \sigma_v - \sigma_b - \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_3 - \Delta u - \Delta u_{r,n}$$

$$\sigma'_{3 \min} = \sigma_3 - \sigma_b + \Delta\sigma_3 - \Delta u - \Delta u_{r,n}$$

$$p'_{\max} = \frac{\sigma_v - 3\sigma_b + 2\sigma_3 + \Delta\sigma_1 - 3\Delta\sigma_3 + 3\Delta u - 3\Delta u_{r,n}}{3}$$

$$p'_{\min} = \frac{\sigma_v - 3\sigma_b + 2\sigma_3 - \Delta\sigma_1 + 3\Delta\sigma_3 - 3\Delta u - 3\Delta u_{r,n}}{3}$$

$$\bar{p}'_{\text{moyen}} = \frac{(p'_{\max} + p'_{\min})}{2}$$

Remarque: $\Delta u_{r,n}$ prend en compte toutes les surpressions résiduelles accumulées par les n cycles précédents.

$$q_{\max} = \sigma_v - \sigma_3 + \Delta\sigma_1 = 2\tau_{\max}$$

$$q_{\min} = \sigma_v - \sigma_3 - \Delta\sigma_1 = 2\tau_{\min}$$

$$\begin{aligned}\phi'_{\text{mob}} &= \arcsin \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \\ &= \arcsin \frac{(\sigma_v - \sigma_3 + \Delta\sigma_1)}{\sigma_v - 2\sigma_b + \sigma_3 + \Delta\sigma_1 + 2\Delta\sigma_3 + 2\Delta\sigma_u - 2\Delta\sigma_{u,r,n}}\end{aligned}$$

$$\phi'_{\text{mob}} = \arcsin \frac{3(q_{\max}/p'_{\max})}{(6 + q_{\max}/p'_{\max})}$$

Nombre théorique de cycles pour atteindre la liquéfaction initiale: n_1

$$n_1 = \frac{p' \cdot m}{\Delta u_{r,m}} \quad (\text{valeur extrapolée})$$

B. Déformations

Le volume reste constant (essai non drainé):

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{2 \cdot m \cdot H} = \frac{\varepsilon_2}{2} = \frac{\varepsilon_3}{3} \quad \left(\text{ici: } \varepsilon_1 < 1\%_{\infty} \right)$$

Δh = déformation verticale mesurée après m cycles d'un palier $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$

m = nombre de cycles d'un palier $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$

H = hauteur moyenne de l'échantillon

$$G_{\max} = 3230 \frac{(2,973 - e)}{1 + e} p'_o{}^{1/2} \quad (\text{kN/m}^2) \quad (\text{STUDER 1977})$$

avec $p' = 137 \text{ kN/m}^2$ et $e = 0,53$: $G_{\max} = 247 \text{ MN/m}^2$

C. Fréquence des oscillations

D'ordinaire, la fréquence a été fixée à 0,5 Hz. Elle est choisie de telle manière que le dispositif graphique puisse reproduire clairement les variations de contraintes ou de déformations.

D. Dimensions de l'échantillon

Volume : 5,406 l

Diamètre initial : 149 mm

Hauteur initiale : 310 mm

E. Matériau

Le sable utilisé contient un peu plus de limon que le sable standard (cf. indice de vide initial = 0,53).

Sable de Granges

Conditions initiales

$P = 2,47 \text{ kN}$
 $\sigma_b = u = 883 \text{ kN/m}^2$
 $\sigma_3 = 981 \text{ kN/m}^2$
 $\sigma_v = 1095 \text{ kN/m}^2$
 $p = 1019 \text{ kN/m}^2$
 $p' = 137 \text{ kN/m}^2$
 $q = 114 \text{ kN/m}^2$
 $K_0 = 0,89$
 indice de vide = 0,53
 $\gamma_d = 17,1 \text{ kN/m}^3$
 $B = 0,966$

Légende:

Toutes les contraintes sont données en kN/m^2
 A, n_1 : (-)
 θ'_{mob} : (°)
 Δh : (μm)
 déf. : déformations :
 - décroissant de cycle en cycle
 + croissant de cycle en cycle et dyssymétrique

| Pallier no. | Nbre de cycles | $\Delta\sigma_1$ | $\Delta\sigma_3$ | Δp | Δu | $\Delta u_{r,n}$ | A | p'_{max} | p'_{min} | q_{max} | q_{min} | $\frac{\Delta\tau}{p'}$ | n_{1th} | ϕ'_{mob} | h | def. |
|-------------|----------------|------------------|------------------|------------|------------|------------------|-------|------------|------------|-----------|-----------|-------------------------|-----------|---------------|-----|------|
| 1 | 15 | 42 | -16 | -2,0 | -9 | 0 | 0,16 | 144 | 130 | 156 | 72 | 0,15 | 257 | 27,3 | 280 | - |
| 2 | 10 | 65 | -24 | -2,3 | -15 | 8 | 0,3 | 142 | 116 | 179 | 49 | 0,25 | 161 | 31,5 | 300 | - |
| 3 | 10 | 90 | -31 | -1,0 | -23 | 16 | 0,08 | 143 | 99 | 204 | 24 | 0,37 | 151 | 35,2 | 280 | - |
| 4 | 10 | 95 | -31 | 0,7 | -25 | 24 | 0,05 | 139 | 87 | 209 | 19 | 0,42 | 81 | 37,0 | 440 | - |
| 5 | 16 | 115 | 39 | 0,7 | -40 | 38 | -0,02 | 138 | 60 | 229 | -1 | 0,58 | - | 40,4 | 900 | - |
| 6 | 16 | 125 | 43 | 1,3 | | | | | | | | | | | | + |
| 7 | 6 | 135 | -43 | 2,0 | | | | | | | | | | | | + |

extension

Sable de Granges

Conditions initiales

P = 2,63 kN
 $\sigma_b = u = 883 \text{ kN/m}^2$
 $\sigma_3 = 981 \text{ kN/m}^2$
 $\sigma_v = 1104 \text{ kN/m}^2$
 $p = 1022 \text{ kN/m}^2$
 $p' = 140 \text{ kN/m}^2$

q = 123 kN/m²

K₀ = 0,88

indice de vide = 0,53

$\gamma_d = 17,1 \text{ kN/m}^3$

B = 0,974

Légende:

Toutes les contraintes sont données en kN/m²

A, n_l : (-)

β'_{mob} : (°)

Δh : (µm)

déf. : déformations :

- décroissant de cycle en cycle

+ croissant de cycle en cycle et dyssymétrique

| Palier no. | Nbre de cycle | $\Delta\sigma_1$ | $\Delta\sigma_3$ | Δp | Δu | $\Delta u_{r,n}$ | A | p' _{max} | p' _{min} | q _{max} | q _{min} | $\frac{\Delta T}{\bar{p}'}$ | n _l th | ϕ'_{mob} | Δh | def. |
|------------|---------------|------------------|------------------|------------|------------|------------------|-------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------------------|-------------------|---------------|------------|------|
| 1 | 10 | 37 | -16 | -3,7 | -3 | 0 | 0,34 | 139 | 141 | 160 | 86 | 0,13 | 233 | 28,8 | 20 | - |
| 2 | 10 | 62 | -24 | -3,3 | -13 | 6 | 0,17 | 144 | 124 | 185 | 61 | 0,23 | 670 | 32,0 | 70 | - |
| 3 | 10 | 84 | -31 | -3,0 | -22 | 8 | 0,10 | 151 | 113 | 207 | 39 | 0,32 | 165 | 33,9 | 210 | - |
| 4 | 10 | 110 | -39 | -2,3 | -3,4 | 16 | 0,04 | 156 | 93 | 233 | 13 | 0,44 | 104 | 36,8 | 370 | - |
| 5 | 10 | 142 | -43 | +4,3 | -43 | 28 | -0,01 | 159 | 65 | 265 | -19 | 0,63 | - | 40,6 | 700 | - |
| 6 | 11 | 146 | 0 | +48,7 | -7 | 43 | -0,05 | 153 | 41 | 269 | -23 | 0,75 | - | 42,9 | >700 | + |
| 7 | 7 | 152 | -47 | +3,7 | | | | | | | | | | | | + |

extension

ESSAI TRIAXIAL DYNAMIQUE DU 5.12.1985

Sable de Granges

Conditions initiales

P = 2,45 kN
 $\sigma_b = u = 883 \text{ kN/m}^2$
 $\sigma_3 = 981 \text{ kN/m}^2$
 $\sigma_v = 1094 \text{ kN/m}^2$
p = 1019 kN/m²

p' = 137 kN/m²
q = 113 kN/m²
K₀ = 0,89
indice de vide = 0,53
 $\gamma_d = 17,1 \text{ kN/m}^3$
B = 0,939

Légende:

Toutes les contraintes sont données en kN/m²
A, n₁ : (-)
p', mob : (o)
h : (m)
déf. : déformations :
- décroissant de cycle en cycle
+ croissant de cycle en cycle et dyssymétrique

| Palier no. | Nbre de cycle | $\Delta\sigma_1$ | $\Delta\sigma_3$ | Δp | Δu | $\Delta u_{r,n}$ | A | p' max | p' min | q max | q min | $\frac{\Delta\tau}{p'}$ | n ₁ th | p' mob | Δh | def. |
|------------|---------------|------------------|------------------|------------|------------|------------------|-------|--------|--------|-------|-------|-------------------------|-------------------|--------|------------|------|
| 1 | 8 | 29 | -16 | -6,3 | -8 | 0 | 0,24 | 138 | 135 | 142 | 84 | 0,11 | 100 | 26,0 | 150 | - |
| 2 | 10 | 52 | -24 | -6,7 | -12 | 11 | 0,20 | 131 | 120 | 165 | 61 | 0,21 | 90 | 31,4 | 700 | - |
| 3 | 10 | 78 | -31 | -5,0 | -22 | 25 | 0,09 | 129 | 95 | 191 | 35 | 0,35 | 102 | 36,5 | 1080 | - |
| 4 | 10 | 105 | -39 | -4,0 | -36 | 36 | 0,01 | 133 | 69 | 218 | 8 | 0,52 | 92 | 40,2 | 1500 | - |
| 5 | 8 | 122 | -43 | -2,3 | -40 | 47 | 0 | 127 | 52 | 235 | -9 | | | 44,9 | 1300 | - |
| 6 | 5 | 122 | 0 | 40,7 | -10 | 59 | -0,08 | 128 | 27 | 235 | -9 | | | 44,6 | 700 | - |
| 7 | 5 | 140 | -47 | -0,3 | -55 | 61 | | | | | | | | | | + |
| 8 | 3 | 140 | 0 | 46,7 | -24 | 78 | | | | | | | | | | + |
| 9 | 3 | 155 | -55 | -3,3 | - | 88 | | | | | | | | | | + |

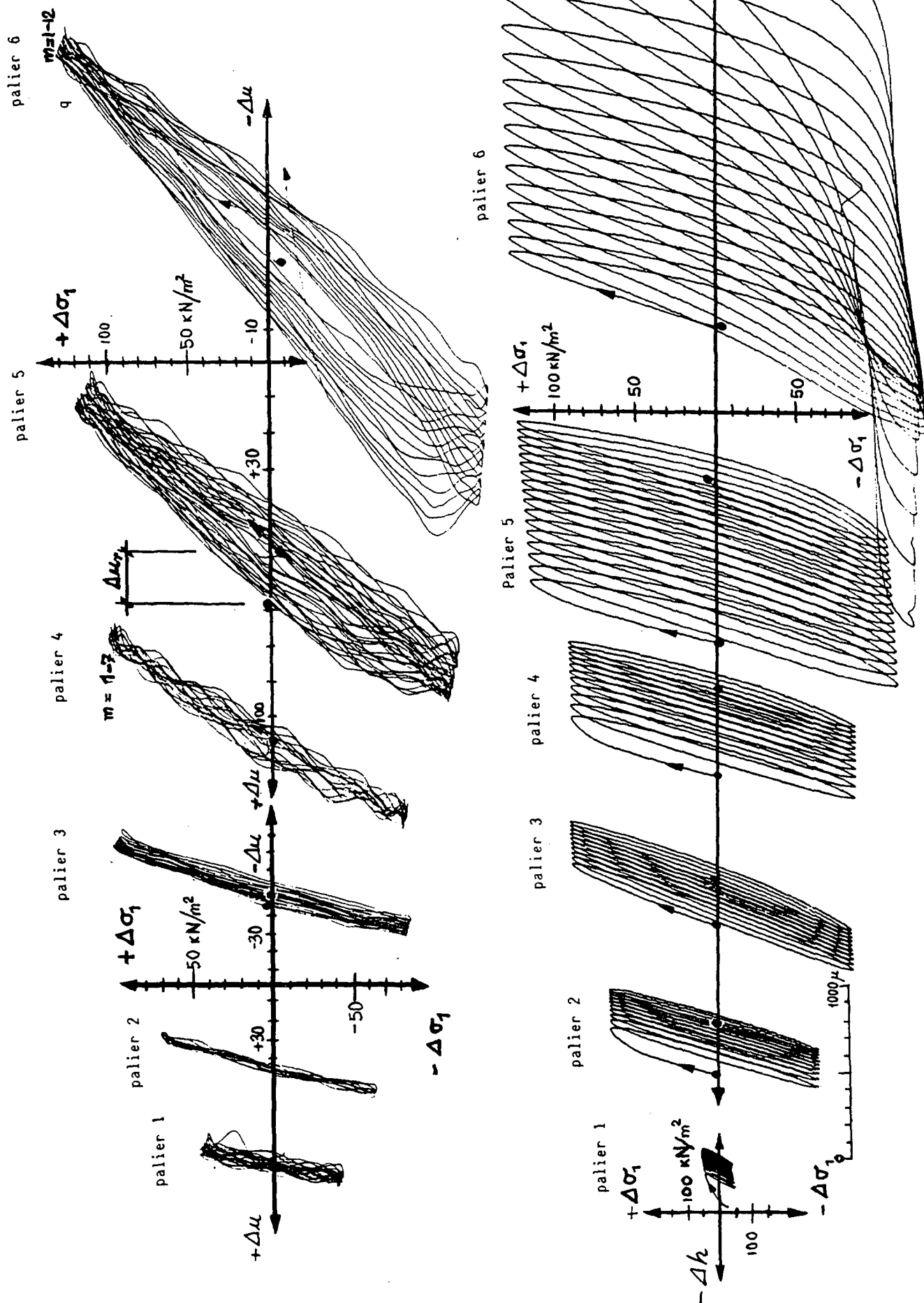
extension

Essai triaxial dynamique du 27.11.85

Sable de Granges

Courbes expérimentales

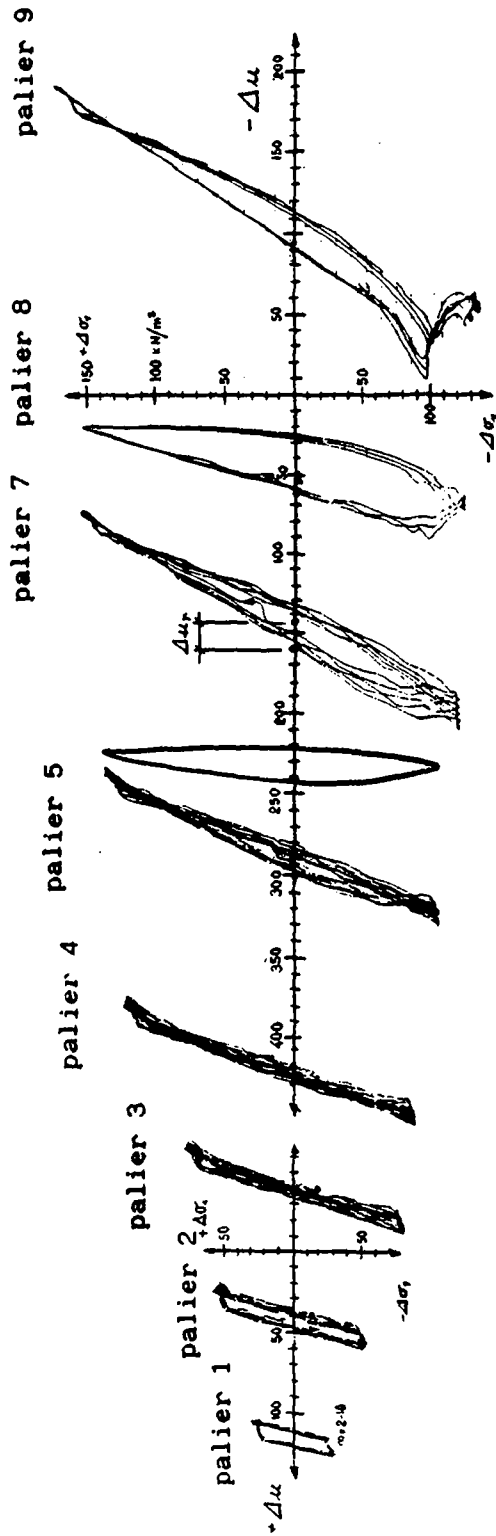
Fig. 87



Essai triaxial dynamique du 5.12.85

Sable de Granges

Courbes expérimentales



Contrainte $\Delta\sigma_1$ et pression interstitielle $\Delta\mu$

palier 7

palier 6

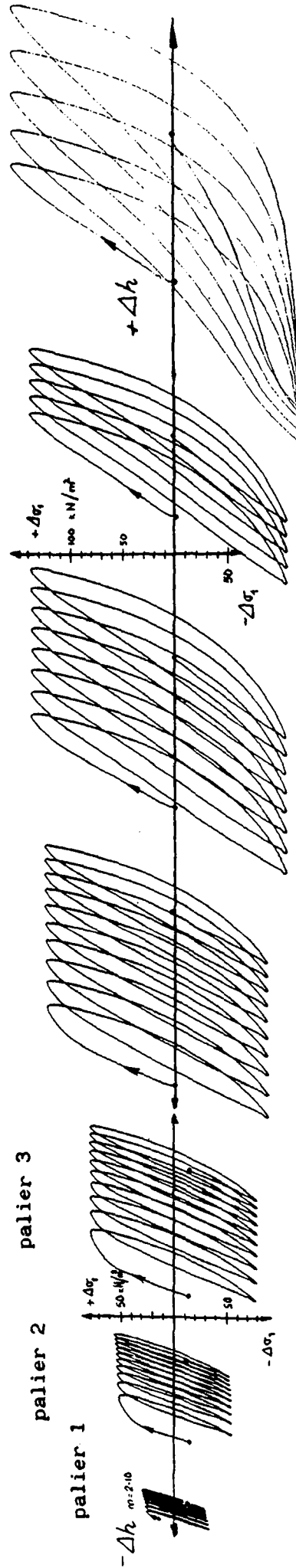
palier 5

palier 4

palier 3

palier 2

palier 1



0 1000 μm 2000 μm

Contrainte $\Delta\sigma_1$ et déformation verticale Δh

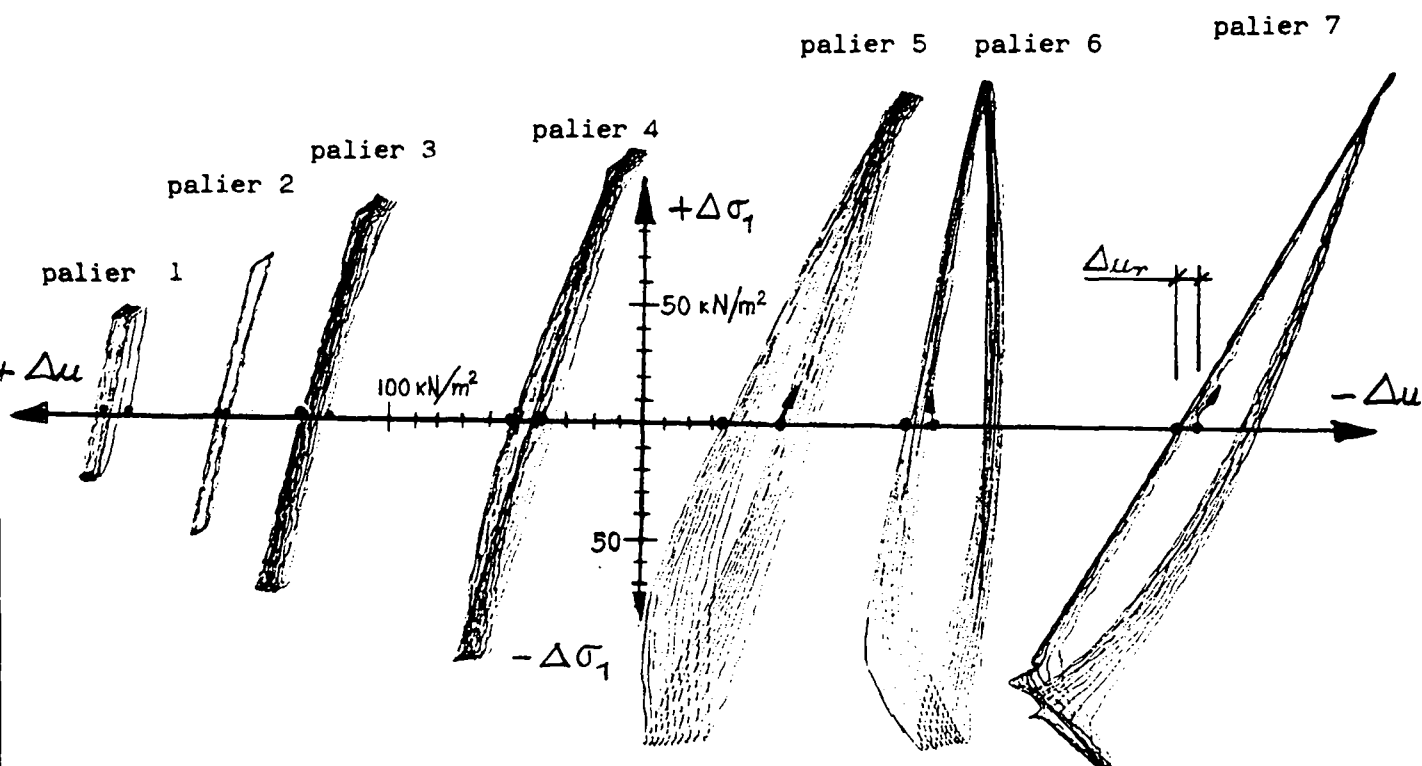
Fig. 88

Fig. 89

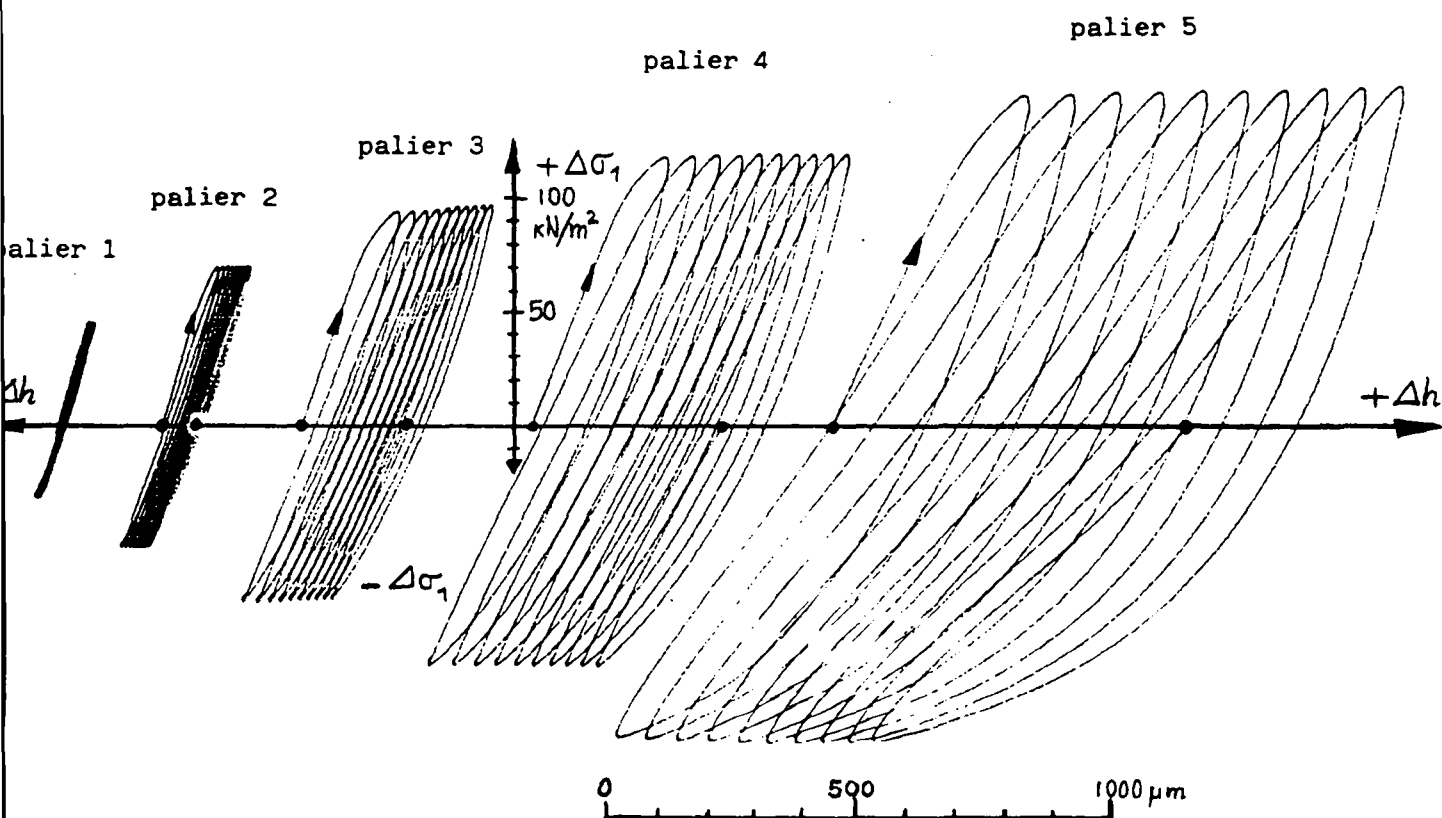
Essai triaxial dynamique du 17.12.85

Sable de Granges

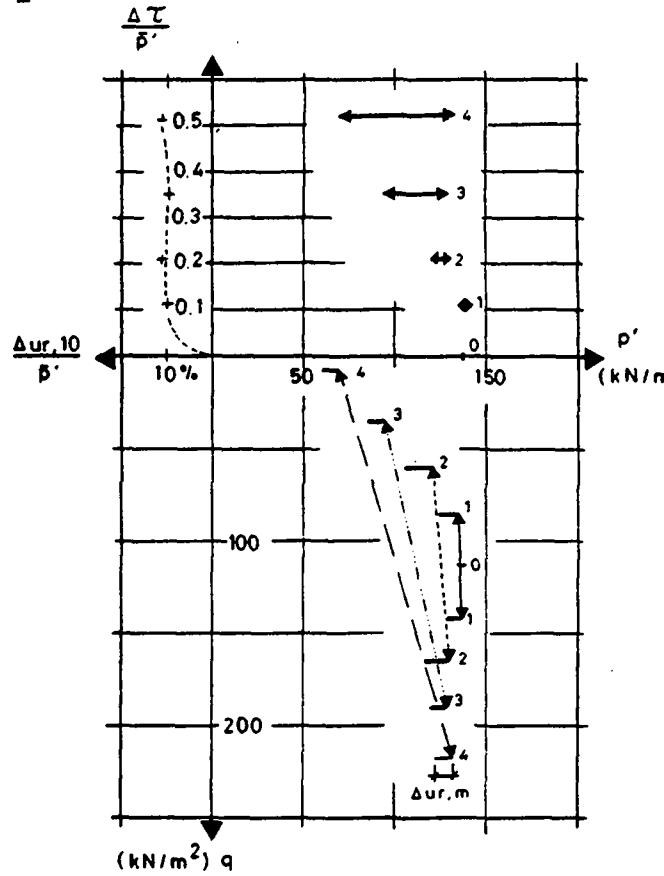
Courbes expérimentales



Contrainte $\Delta \sigma_1$ et pression interstitielle Δu



Contrainte $\Delta \sigma_1$ et déformation verticale Δh



Essai du 5.12.1985

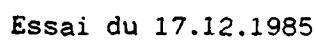


Fig. 90 : Essais triaxiaux dynamiques: sable de Granges paliers de charge

6.7.3. Conclusions concernant les essais triaxiaux dynamiques

Nous n'avons pas pu tester notre sable dans des conditions proches de celles qui régissent un dépôt fraîchement constitué.

En effet, nos sables ont subi une contrainte de consolidation (140 kN/m^2) très forte. Les échantillons sont de grande taille. Il est donc peu probable que les contraintes y soient homogènes, comme le suggère le diagramme des pressions pour les paliers de charge élevés (flambage des échantillons).

Les vibrations n'ont pas conduit à une rupture évidente par liquéfaction, mais simplement à une augmentation de la pression interstitielle.

6.8. ESSAIS SUR TABLE VIBRANTE

Le Laboratoire de Mécanique Appliquée du Département de Mécanique de l'EPFL a mis sa performante table vibrante à notre disposition. Nous avons cherché à retrouver les cas de charge conduisant à la formation de balls-and-pillows en utilisant les sables et limons de Granges.

Les paramètres suivants ont varié:

- accélération; 0,05 à 0,4 g (sollicitations sinusoïdales et fréquence de 10 Hz),
- épaisseur des limons: 2,5 à 11 cm (cuve de 50 cm de côté),
- épaisseur des sables sur les limons: 2 à 5 cm.

Nous avons pu recréer des diapirs de limon et des balls-and-pillows sableux de manière répétitive, avec, comme conditions:

- L'accélération: à 0,2 g: au bout de quelques minutes
à 0,4 g: formation instantanée.
- L'épaisseur des limons n'est pas déterminante, en revanche, l'indice de vide des limons - de l'ordre de 0,6 à 0,8 - joue un rôle plus important. Les diapirs se forment au milieu du limon et migrent lentement avec une vitesse d'environ 1 mm/s.
- L'épaisseur des sables et l'hétérogénéité de la surcharge (par exemple en simulant une ride) n'ont pas paru importantes.

Annexe 7

Mécanismes de déformations

| | | |
|-----|---|--------|
| 7.1 | Liquéfaction par surcharge appliquée rapidement | p. 194 |
| 7.2 | Liquéfaction sous l'effet d'un séisme | p. 204 |
| 7.3 | Liquéfaction sous l'effet de la houle | p. 217 |
| 7.4 | Liquéfaction sous l'effet d'une crue | p. 223 |
| 7.5 | Dégazage des sédiments | p. 226 |

7.1. LIQUÉFACTION PAR SURCHARGE APPLIQUÉE RAPIDEMENT

Ce chapitre donne les deux vitesses critiques de percolation:

- la vitesse de liquéfaction, c'est-à-dire celle qui amène la boulangée d'un sol (7.1.1),
- la vitesse d'entraînement des particules (7.1.2).

Puis les forces de percolation sont calculées lors de la consolidation unidirectionnelle.

7.1.1. Vitesse de liquéfaction (limite inférieure amenant la boulangée)

(d'après Suter 1980)

A. Hypothèses:

- lit de hauteur H composé de particules sphériques de diamètre d et de masse spécifique ρ_s
- écoulement ascendant de vitesse v et de section S
- fluide newtonien de viscosité cinématique ν et de masse volumique ρ_f

Critère: la force de percolation doit être supérieure ou égale au poids du lit déjaugé

$$\Delta p \cdot S > g \cdot H (1-n) (\rho_s - \rho_f) S$$

où Δp = perte de charge par unité de surface (N/m^2)

n = porosité du lit (-)

B. Perte de charge:

$$\Delta p = N \cdot \psi \cdot \rho_f \cdot \frac{v_p^2}{2}$$

où N = nombre de pores en série (-)

ψ = coefficient de rugosité des pores (-)

v_p = vitesse du fluide dans les pores (m/s)

$N = H/d_h$

d_h = diamètre hydraulique d'un pore

$$\begin{aligned} d_h &= 4 \frac{\text{section}}{\text{périphérie}} = 4 \frac{\text{volume pores}}{\text{surface pores}} = 4 \frac{\text{volumes pores/volume}}{\text{surface pores/volume}} \\ &= 4 \frac{n}{\pi d^2 (1-n) \cdot \frac{6}{\pi d^3}} = \frac{2n d}{3(1-n)} \end{aligned}$$

$$\psi = 2,3 + \frac{150}{\text{Rep}} \quad (\text{établi empiriquement})$$

(turbulent) (laminaire)

$$Rep = \frac{v_p \cdot d_h}{\nu} = \text{nombre de Reynolds des pores}$$

$$v_p = \frac{v}{n} \quad \text{où } \nu = \text{viscosité cinématique de l'eau}$$

$$\text{ainsi } Rep = \frac{v \cdot 2n \cdot d}{n \cdot 3(1-n)} = \frac{2 v \cdot d}{3(1-n)\nu} = \frac{2 Re}{3(1-n)}$$

$$\psi = 2,3 + \frac{225(1-n)}{Re}$$

Δp devient:

$$\Delta p = \frac{3}{4} \frac{(1-n)}{n^3} \cdot \frac{h}{d} \cdot \rho_f \cdot \left(2,3 + \frac{225(1-n)}{Re} \cdot 1 \right) v^2$$

$$\text{ou } \Delta p \geq gH(1-n)(\rho_s - \rho_f) \quad (\text{condition de liquéfaction})$$

Après réarrangement:

$$\frac{3}{4} \frac{v^2}{n^3} \left(2,3 + \frac{225}{Re} (1-n) \right) \geq \frac{g(\rho_s - \rho_f) \cdot d}{\rho_f}$$

$$\text{En posant } v^2 = \frac{Re^2 \nu^2}{d^2}$$

$$\frac{3}{4} \frac{v^2}{n^3} \left(2,3 + \frac{225}{Re} (1-n) \right) \geq \frac{g(\rho_s - \rho_f) d^3}{\rho_f \cdot v^2}$$

$$\frac{1,75}{n^3} Re^2 + 170 \frac{(1-n)}{n^3} Re \geq \frac{g(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f \cdot v^2} \cdot d^3 = A$$

Ces équations peuvent s'écrire en fonction de la vitesse:

$$\left(\frac{1,75 \cdot d^2}{v^2 \cdot n^3} \right) \cdot v^2 + \left(170 \frac{(1-n)}{n^3 \cdot v} \cdot d \right) v \geq g \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f \cdot v^2} \cdot d^3 = A$$

D'où l'on tire:

$$v \geq \frac{-170 \frac{(1-n)}{n^3 \cdot v} \cdot d + \left(\left(170 \cdot \frac{(1-n)d}{n^3 \cdot v} \right)^2 + 7g \frac{(\rho_s - \rho_f) d^5}{\rho_f \cdot v^4 \cdot n^3} \right)^{\frac{1}{2}}}{3,5 \frac{d^2}{v^2 \cdot n^3}} > 0$$

$$v \geq \frac{-170 \cdot (1-n) \nu}{3,5 d} + \frac{\left(\left(\frac{170(1-n)}{n^3 \cdot v} \cdot d \right)^2 + 7g \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f \cdot v^4 \cdot n^3} \cdot d^5 \right)^{\frac{1}{2}} \cdot v^2 \cdot n^3}{3,5 d^2}$$

$$v \geq \frac{-170(1-n)\nu}{3,5 d} + \left(\left(\frac{170}{3,5} \right)^2 \frac{(1-n)^2 v^2}{d^2} + \frac{2}{3,5} g \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \cdot d \cdot n^3 \right)^{\frac{1}{2}}$$

7.1.2 Vitesse d'entraînement des particules

Cette vitesse correspond à la vitesse de chute v_c d'une particule dans un milieu stagnant (équilibre de la Trainée et du poids déjaugé de la particule).

GIBBS et al. 1971 ont donné une relation empirique établie pour $Re \leq 4000$

$$v_c = \frac{3\mu + \left\langle 9\mu^2 + gr^2 + \rho f (\rho_s - \rho f) (0,015476 + 0,19841 r) \right\rangle^{\frac{1}{2}}}{\rho f (0,011607 + 0,14881 r)}$$

avec V_c : cm/s

μ : viscosité dynamique: Poise = g/cm · s

g : cm/s²

r : rayon de la particule sphérique: cm

ρ : g/cm³

7.1.3. Forces de percolation pendant la consolidation unidirectionnelle

A. Hypothèses de calcul (LAMBE et WHITMAN 1969)

1. Le sol est saturé et homogène;
2. la couche de sol est horizontale, d'épaisseur constante;
3. la surcharge appliquée est uniforme et constante sur toute l'étendue de la couche;
4. l'eau et les particules solides sont incompressibles;
5. le tassement instantané élastique est nul;
6. l'expulsion de l'eau a lieu uniquement suivant une direction verticale;
7. le sol ne se déforme pas latéralement (frettage; coefficient de Poisson = 0);
8. le coefficient de perméabilité de Darcy est constant;
9. l'écoulement de l'eau est toujours laminaire ($Re = \frac{v d}{\nu} < 1$);
10. lors de la mise en place de la surcharge, la pression interstitielle de la couche de support reprend toute la surcharge.

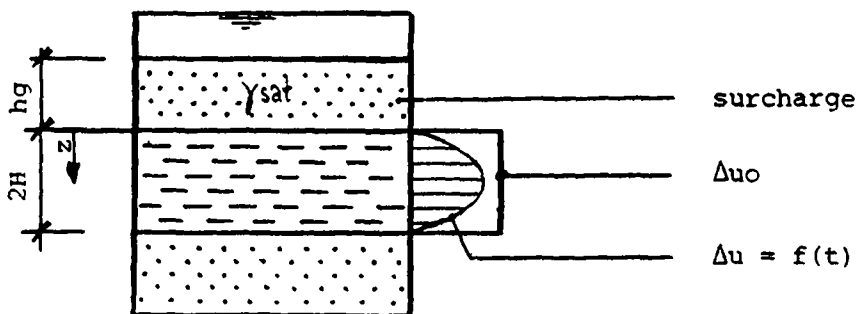


Fig. 91: Définition des symboles pour la consolidation unidirectionnelle

L'équation de la consolidation unidirectionnelle s'écrit

$$C_v \frac{\delta^2 \Delta u}{\delta z^2} = \frac{\delta \Delta u}{\delta t}$$

où C_v = coefficient de consolidation (m^2/s)
 $= k/(mv \cdot \gamma_w)$
 k = coefficient de perméabilité de Darcy ($\frac{m}{s}$)
 mv = coefficient de compressibilité (m^2/kN)
 Δu = surpression interstitielle (kN/m^2)

Par développement en séries de Fourier et en posant les conditions aux limites:

- $t = 0$: $\Delta u = \Delta u_0$ pour $0 < \frac{z}{H} < 2$
 - pour tout t : $\Delta u = 0$ aux bornes $\frac{z}{H} = 0$ et $\frac{z}{H} = 2$

avec H = demi-épaisseur de la couche drainée vers le haut et le bas, on obtient:

$$\Delta u = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2\Delta u_0}{M} (\sin MZ) e^{-M^2 T_v}$$

où $M = \frac{\pi}{2} (2m + 1)$

$$Z = \frac{z}{H}$$

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H^2} = \text{facteur de durée}$$

B. Gradient hydraulique i

$$i = \frac{dh}{dz} = \frac{\frac{d\Delta u}{d\Delta u_0}}{\gamma_w \cdot dz} \cdot \frac{\Delta u_0}{H}$$

où dh = perte de charge hydraulique = $\frac{i}{\gamma_w} d \frac{\Delta u}{\Delta u_0} \cdot \Delta u_0$

On pose $\alpha = \frac{d \frac{\Delta u}{\Delta u_0}}{dz}$

Par dérivation: $\alpha = \sum_{m=0}^{\infty} 2(\cos Z) e^{-M^2 T_v}$

$$= 2 \left(\cos \frac{\pi}{2} Z \right) e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot T_v} + 2 \left(\cos \frac{3\pi}{2} Z \right) e^{-\left(\frac{3\pi}{2}\right)^2 \cdot T_v} \\ + 2 \left(\cos \frac{5\pi}{2} Z \right) e^{-\left(\frac{5\pi}{2}\right)^2 \cdot T_v} + \dots$$

Tableau 42: Résultats numériques des vitesses d'entraînement et de liquéfaction en fonction du diamètre des particules

| diamètre (µm) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 70 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 700 | 1000 |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| vitesse de chute (entraînement) (m/s) | $9,132 \cdot 10^{-5}$ | $3,633 \cdot 10^{-4}$ | $8,102 \cdot 10^{-4}$ | $1,423 \cdot 10^{-3}$ | $2,190 \cdot 10^{-3}$ | $4,132 \cdot 10^{-3}$ | $7,857 \cdot 10^{-3}$ | $2,391 \cdot 10^{-2}$ | $4,166 \cdot 10^{-2}$ | $5,936 \cdot 10^{-2}$ | $7,657 \cdot 10^{-2}$ | $1,091 \cdot 10^{-1}$ | $1,536 \cdot 10^{-1}$ |
| vitesse de | $n=0,3$ | $1,495 \cdot 10^{-6}$ | $3,363 \cdot 10^{-6}$ | $5,981 \cdot 10^{-6}$ | $9,345 \cdot 10^{-6}$ | $1,832 \cdot 10^{-5}$ | $3,738 \cdot 10^{-5}$ | $1,495 \cdot 10^{-4}$ | $3,359 \cdot 10^{-4}$ | $5,960 \cdot 10^{-4}$ | $9,282 \cdot 10^{-4}$ | $1,799 \cdot 10^{-3}$ | $3,553 \cdot 10^{-3}$ |
| liquéfact. | $n=0,4$ | $1,035 \cdot 10^{-6}$ | $9,304 \cdot 10^{-6}$ | $1,654 \cdot 10^{-5}$ | $2,584 \cdot 10^{-5}$ | $5,065 \cdot 10^{-5}$ | $1,034 \cdot 10^{-4}$ | $4,129 \cdot 10^{-4}$ | $9,620 \cdot 10^{-4}$ | $1,636 \cdot 10^{-3}$ | $2,530 \cdot 10^{-3}$ | $4,791 \cdot 10^{-3}$ | $8,966 \cdot 10^{-3}$ |
| (m/s) | $n=0,5$ | $2,423 \cdot 10^{-6}$ | $2,180 \cdot 10^{-5}$ | $3,876 \cdot 10^{-5}$ | $6,057 \cdot 10^{-5}$ | $1,187 \cdot 10^{-4}$ | $2,422 \cdot 10^{-4}$ | $9,653 \cdot 10^{-4}$ | $2,152 \cdot 10^{-3}$ | $3,761 \cdot 10^{-3}$ | $5,722 \cdot 10^{-3}$ | $1,034 \cdot 10^{-2}$ | $1,777 \cdot 10^{-2}$ |
| | $n=0,6$ | $5,230 \cdot 10^{-6}$ | $4,707 \cdot 10^{-5}$ | $8,368 \cdot 10^{-5}$ | $1,307 \cdot 10^{-4}$ | $2,562 \cdot 10^{-4}$ | $5,223 \cdot 10^{-4}$ | $2,070 \cdot 10^{-3}$ | $4,548 \cdot 10^{-3}$ | $7,754 \cdot 10^{-3}$ | $1,141 \cdot 10^{-2}$ | $1,910 \cdot 10^{-2}$ | $2,972 \cdot 10^{-2}$ |

Données: $\nu = 1,008 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
 $\rho_s = 2,69 \text{ t/m}^3$
 $\rho_f = 0,998 \text{ t/m}^3$

Tableau 43: Consolidation verticale: coefficient α du gradient hydraulique en fonction du temps et de la profondeur

| $\alpha = d \left(\frac{\Delta U}{\Delta U_0} \right) / dz$ | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\frac{z}{Tv}$ | 0,025 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| 0 | 3,456 | 2,518 | 1,784 | 1,453 | 1,245 | 0,957 | 0,746 | 0,582 | 0,455 | 0,356 | 0,278 | 0,217 | 0,170 |
| 0,1 | 3,183 | 2,398 | 1,740 | 1,428 | 1,227 | 0,945 | 0,736 | 0,575 | 0,449 | 0,351 | 0,274 | 0,214 | 0,168 |
| 0,2 | 2,463 | 2,069 | 1,614 | 1,356 | 1,175 | 0,909 | 0,709 | 0,554 | 0,433 | 0,338 | 0,264 | 0,206 | 0,161 |
| 0,4 | 0,739 | 1,135 | 1,193 | 1,095 | 0,981 | 0,771 | 0,603 | 0,471 | 0,368 | 0,288 | 0,225 | 0,176 | 0,137 |
| 0,5 | 0,215 | 0,719 | 0,949 | 0,926 | 0,847 | 0,673 | 0,527 | 0,412 | 0,322 | 0,251 | 0,196 | 0,153 | 0,120 |
| 0,75 | 0,054 | 0,152 | 0,401 | 0,463 | 0,445 | 0,363 | 0,285 | 0,223 | 0,174 | 0,136 | 0,106 | 0,083 | 0,065 |

$$i = \frac{\alpha \cdot \Delta U_0}{\gamma_w \cdot H}$$

Tv = facteur de durée (-)

z = z/H où z = profondeur

H = demi-hauteur de la couche

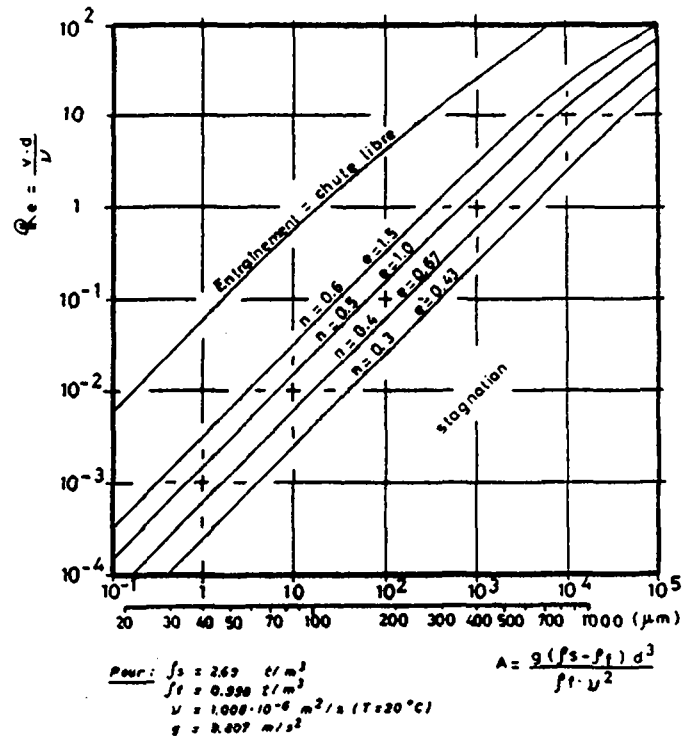


Fig.92 : Limite de fluidisation en fonction du diamètre des particules

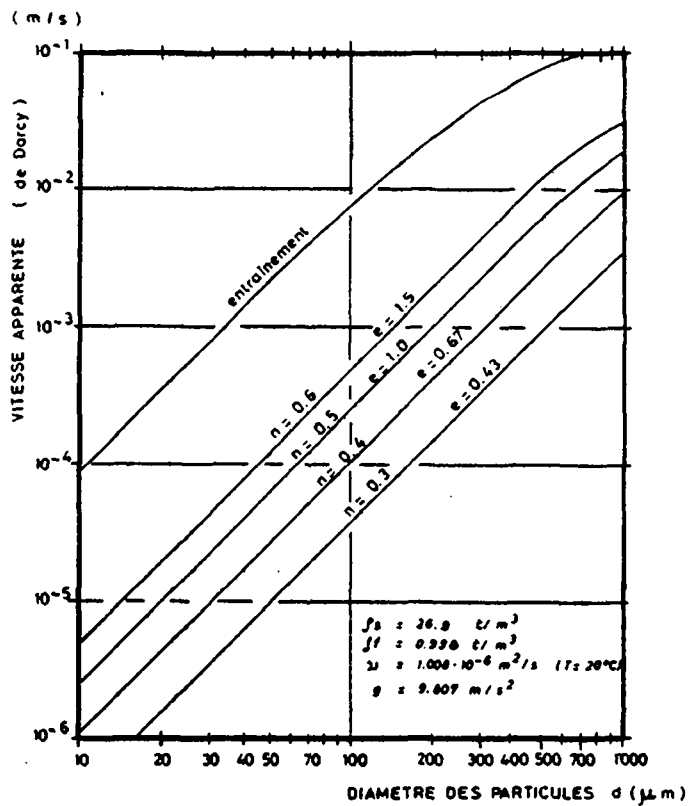


Fig. 93: Vitesse de fluidisation en fonction du diamètre des particules

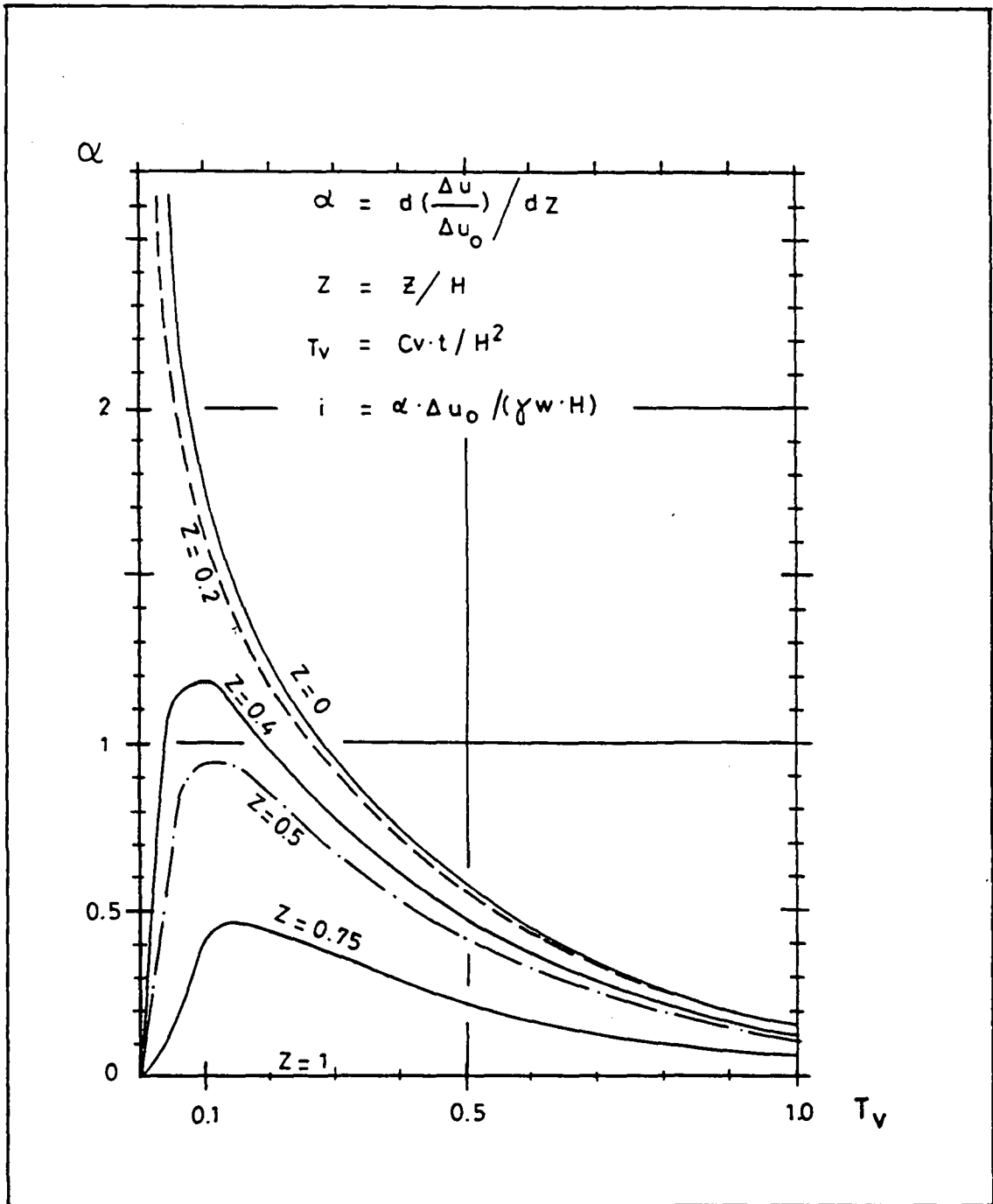


Fig.94 : Consolidation verticale: coefficient α du gradient hydraulique en fonction du temps et de la profondeur (report graphique du tableau 43).

7.2. LIQUEFACTION SOUS L'EFFET D'UN SEISME

| | | |
|---------|---|--------|
| 7.2.1. | Approches "in situ" | p. 205 |
| 7.2.1.1 | Méthode du nombre critique de coups SPT | p. 205 |
| 7.2.1.2 | Méthode du "cisaillement moyen" | p. 207 |
| 7.2.2. | Approches en laboratoire | p. 209 |
| 7.2.2.1 | Cellule triaxiale dynamique | p. 209 |
| 7.2.2.2 | Cellule triaxiale standard | p. 212 |
| 7.2.3. | Application au delta de Granges | p. 214 |

7.2.1. APPROCHES "IN SITU"

Conditions d'application (SEED 1985, Comm. Earthqu. Eng.)

- Equipement: SPT₆₀ (Standard Penetrometer Test où le dispositif utilise le 60% de l'énergie potentielle du mouton)
- $N_1 < 35$ coups/30 cm
- Granulométrie du dépôt: sable et limon

7.2.1.1. MÉTHODE DU NOMBRE CRITIQUE DE COUPS SPT

A. Critère de résistance du sol: N_1

$$N_1 = N C_N$$

où N = nombre de coups mesurés/30 cm

C_M = facteur de correction ramenant N à $\sigma'_r = 100 \text{ kN/m}^2$

$$C_N = \left(\frac{\sigma'_r}{\sigma'} \right)^n$$

n = 0,50 pour $40 < \sigma' < 100 \text{ kN/m}^2$

n = 0,50 pour $\sigma' > 100 \text{ kN/m}^2$ et $60 < D_r < 80\%$

n = 0,57 pour $\sigma' > 100 \text{ kN/m}^2$ et $40 < D_r < 60\%$

σ'_r = contrainte effective de référence: 100 kN/m^2

σ' = contrainte effective à la profondeur où le SPT a donné N

D_r = densité relative obtenue par le SPT₆₀

D_r = $0,18 + 0,042 N_1$ pour $4 \leq N_1 \leq 6$

D_r = $0,28 + 0,045 N_1$ pour $6 \leq N_1 \leq 10$

D_r = $0,36 + 0,017 N_1$ pour $10 \leq N_1 \leq 35$

B. Critère de liquéfaction: N_c

$$N_c = \bar{N} [1 + 0,125 (d_s - 3) - 0,05 (d_w - 2)]$$

où N_c = nombre critique de coups

d_s = profondeur de la couche de sable (m)

d_w = profondeur de la nappe phréatique (m)

\bar{N} = nombre critique de coups/30 cm: valeur dépendant de l'intensité sismique choisie (cette relation est fondée sur des observations de séismes).

| Intensité Medvedev-Sponheuer-Kornik 1964 | Intensité Mercalli modifié | \bar{N} |
|--|----------------------------|-----------|
| VI-VII | 7 | 6 |
| VII-VIII | 8 | 10 |
| VIII-IX | 9 | 16 |

Equivalence MSK-Mercalli modifié: selon Sägesser et Mayer-Rosa 1978 p. 120

Tableau 44: Nombre critique de coups SPT en fonction de l'intensité sismique

C. Liquéfaction pour $N_c > N_1$

7.2.1.2 Méthode du "cisaillement moyen"

A. Critère de résistance du sol: τ_1

$$\tau_1 = \frac{N_1}{a} \cdot \sigma'$$

où τ_1 = résistance au cisaillement limite du sol

N_1 = $N C_N$ (selon procédure 1)

σ' = contrainte effective à la profondeur où la SPT₆₀ a donné N

a = coefficient d'affaiblissement du sol dépendant de l'intensité sismique

| Magnitude de Richter | a |
|-------------------------|----|
| 5 | 58 |
| 6 | 69 |
| 7 | 83 |
| 8 | 98 |

$$M_{\text{Richter}} = 0,67 I_{\text{MSK}} + 2,3 \lg_{10} h - 2,0$$

où I_{MSK} = intensité MSK à l'épicentre

h = profondeur de l'hypocentre (km)

Tableau 45 : Coefficient d'affaiblissement en fonction de l'intensité sismique.

B. Critère de liquéfaction: τ_m

$$\tau_m = 0,65 \cdot \tau_{\text{max}} = 0,65 \cdot \sigma \cdot \frac{a_{\text{max}}}{g} \cdot r_d$$

où τ_m = contrainte de cisaillement moyen

σ = contrainte totale à la profondeur considérée

g = accélération de la gravité

r_d = coefficient d'amortissement en fonction de la profondeur et du type de terrain.

| profondeur (m) | r_d |
|-------------------|-----------------|
| 0 | 1,0 |
| 5 | $0,97 \pm 0,02$ |
| 10 | $0,91 \pm 0,05$ |
| 15 | $0,75 \pm 0,14$ |
| 20 | $0,62 \pm 0,20$ |
| 25 | $0,55 \pm 0,20$ |
| 30 | $0,50 \pm 0,20$ |

Tableau 46 : Coefficient d'amortissement en fonction de la profondeur et du type de terrain.

a_{\max} = accélération maximum de dimensionnement dépendant de l'intensité sismique choisie et du type de terrain.

Il existe de nombreuses relations empiriques donnant l'ordre de grandeur de l'accélération en fonction de l'intensité sismique.

$$\lg_{10} a_{\max} = 0,26 I_{\text{MSK}} + 0,19 \text{ (a en cm/s}^2\text{)} \text{ (O'BRIEN)}$$

$$\lg_{10} a_{\max} = 0,38 I_{\text{MSK}} - 0,24 \text{ (a en cm/s}^2\text{)} \text{ (AMBRASEYS)}$$

$$\lg_{10} a_{\max} = 0,326 I_{\text{MSK}} - 0,50 \text{ (a en cm/s}^2\text{)} \text{ (MEDVEDEV-SPONHEUER)}$$

(SAEGESSER et MAYER-ROSA 1978 p. 121)

C. Liquéfaction pour $\tau_m > \tau_l$

SEED admet un coefficient de sécurité $\frac{\tau_l}{\tau_m}$ égal à 1,33 comme suffisant "si l'intensité sismique choisie est adéquate" (Committee on Earthquake 1985 p. 96).

7.2.2. APPROCHES EN LABORATOIRE

7.2.2.1 Cellule triaxiale dynamique (SEED et al. 1983)

A. Critère de résistance du sol: n_1

Toute une série d'essais triaxiaux C-U sont entrepris à l'indice de vide mesuré in situ. Pour un nombre de cycles donné, le sol atteint un état de "liquéfaction initiale". Les grains ont alors perdu le contact entre eux. La pression interstitielle u est égale à la contrainte effective moyenne p' et les déformations spécifiques $\varepsilon = \Delta h/h$ dépassent d'ordinaire 5%. L'étude paramétrique porte sur

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 p'} = \frac{\Delta \tau}{\bar{p}'}$$

où σ_1 = contrainte verticale

σ_3 = contrainte latérale

\bar{p}' = contrainte moyenne effective

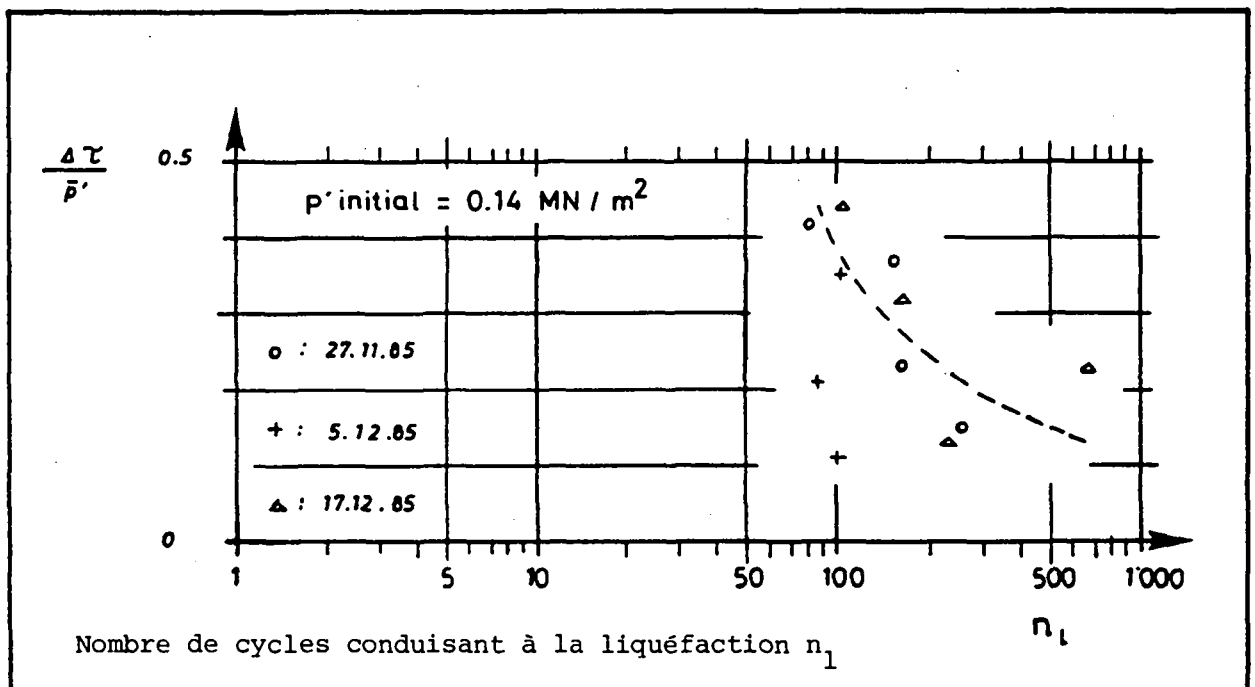


Fig. 95: Liquéfaction initiale du sable standard de Granges
(cellule dynamique de l'EPFZ)

De ces essais, on tire le nombre de cycles équivalents correspondant à l'intensité moyenne du séisme choisi:

$$\frac{\tau_m}{\sigma'} = 0,65 \cdot \frac{a_{\max} \cdot \sigma}{g \cdot \sigma'} \cdot r_d = \frac{\Delta \tau}{\bar{p}'}$$

où a_{\max} , σ , σ' et r_d : voir procédure du "cisaillement moyen" de SEED 1985

B. Critère de liquéfaction: n_s

SEED et al. 1983 ont rassemblé les données de séismes dans le tableau où les mesures in situ sont ramenées aux nombres de cycles équivalents de la cellule triaxiale.

| Magnitude de Richter | Nombre de cycles équivalents n_s |
|----------------------|------------------------------------|
| 5 1/4 | 2 - 3 |
| 6 | 5 - 6 |
| 6 3/4 | 10 |
| 7 1/2 | 15 |
| 8 1/2 | 26 |

Tableau 47: Nombre de cycles équivalents de cisaillement moyen en fonction de l'intensité sismique

n_s peut être aussi calculé à partir d'un accélérogramme que l'on décompose en N classes; par exemple:

classe 1 : 0,1 - 0,3 g : fréquence X_1
 classe 2 : 0,3 - 0,5 g : fréquence X_2
 . : .
 . : .
 . : .
 classe N : a_{\max} : fréquence X_N

Pour chaque classe ainsi que pour $0,65 a_{\max}$, on mesure sur la cellule triaxiale le nombre de cycles m_i provoquant la liquéfaction initiale:

classe 1 : m_1 cycles
 .
 .
 classe N : m_N cycles

 $0,65 a_{\max}$: $m_{0,65}$ cycles

n_s s'obtient par sommation de toutes les classes:

$$n_s = \sum_{i=1}^N \Delta n_s$$

où $\Delta n_s = \frac{X_i \cdot m_{0,65}}{m_i}$

C. Liquéfaction pour $n_s > n_l$

Remarque:

La liquéfaction initiale ne signifie par forcément que le sol va se liquéfier "in situ", car on ne tient pas compte d'une dilatance possible. Une augmentation de volume du terrain fait alors chuter la pression interstitielle (voir tableau 15 p. 90).

7.2.2.2 CELLULE TRIAXIALE STANDARD (POULOS ET AL. 1985)

A. Critère de résistance de Casagrande: τ_{su}

CASAGRANDE 1976 a rappelé qu'uniquement les sols lâches peuvent créer des surpressions interstitielles lors de leur tassement. Quand de grandes déformations détruisent la structure du sol, la résistance au cisaillement se réduit fortement à une valeur résiduelle qui doit seule assurer la stabilité vis-à-vis des contraintes naturelles de cisaillement.

Dans la procédure de POULOS et al. 1985, on détermine cette résistance, en admettant que l'intensité et la durée du séisme sont suffisamment grandes pour liquéfier le sol.

Toute une série d'essais triaxiaux C-U avec des contraintes de consolidation différentes sont effectuées de manière à obtenir un "diagramme d'état" (voir détails à l'annexe 6.6 p. 177).

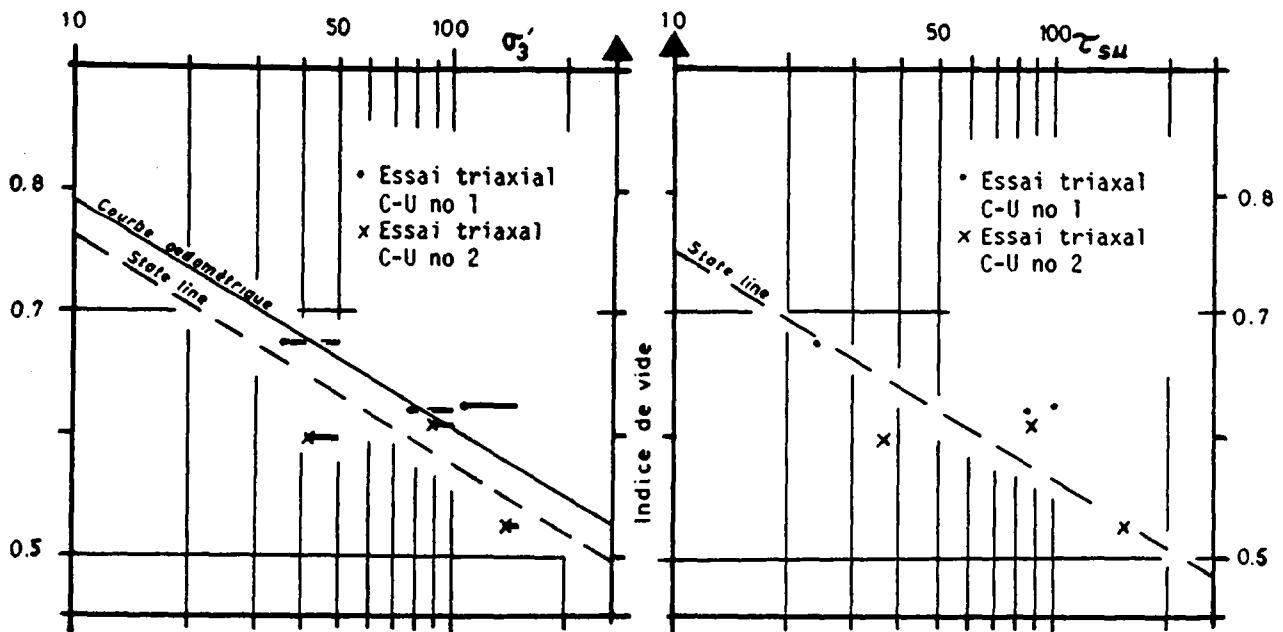


Fig. 96 : Diagramme d'état du limon standard de Granges (cellule triaxiale de l'EPFL)

De ce diagramme, on tire la résistance au cisaillement à l'état permanent τ_{su} correspondant à l'indice de vide "in situ" grâce à la relation:

$$\tau_{su} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \cos \alpha \sin \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3}$$

où σ'_3 = contrainte effective mineure de confinement lors du cisaillement résiduel

σ'_1 = contrainte effective majeure de confinement lors du cisaillement résiduel

B. Contraintes naturelles τ_n

Les contraintes naturelles de cisaillement τ_n sont calculées en différents points du sol, sans tenir compte de l'effet d'un séisme.

C. Rupture pour $\tau_{su} < \tau_n$

7.2.3 APPLICATION AU DELTA DE GRANGES

Approches "in situ"

Intensité MSK: VII; Magnitude de Richter: 4 (admis)

7.2.3.1. Procédure du "nombre critique de coups"

Hypothèses

N = 2 coups/30 cm (correspondant à env. 10 coups/20 cm au pénétromètre Von Moos P2)

$\gamma' = (15-10) \cdot 1 = 5 \text{ kN/m}^2$

$d_s = 1 \text{ m}$

$d_w = 0$

N = 8 coups/30 cm

A. Critère de résistance

$$N_1 = N \cdot C_N = 2 \left(\frac{100}{5} \right)^{0,5} = 9$$

B. Critère de liquéfaction

$$N_C = 8 \{ 1 + 0,125 \langle 1-3 \rangle - 0,05 \langle 0-2 \rangle \} = 7$$

C. Pas de liquéfaction car $N_1 > N_C$

7.2.3.2. Procédure du "cisaillement moyen"

Hypothèses

N = 2 coups/30 cm

$\sigma = 15 \text{ kN/m}^2$

a = 50

$\frac{a_{\max}}{g} = 0,1$ (moyenne des relations $a_{\max} - I_{\text{MSK}}$)

A. Critère de résistance

$$\tau_1 = \frac{2(15-10)}{50} = 0,2 \text{ kN/m}^2$$

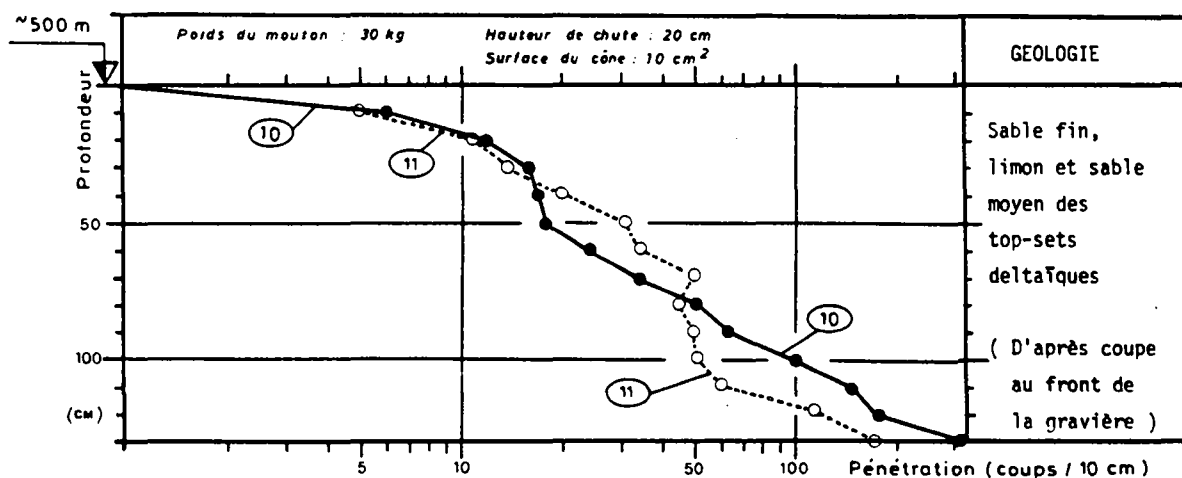
B. Critère de liquéfaction

$$\tau_m = 0,65 \cdot 15 \cdot 0,1 = 1 \text{ kN/m}^2$$

C. Liquéfaction car $\tau_m > \tau_1$

(10) : Coord.: 557'590 / 178'834 / Altitude approx. 500 m

(11) : Coord.: 557'585 / 178'836 / Altitude approx. 500 m



Ces valeurs sont très élevées car les sédiments sont secs.

Fig. 97 : Sondages No. 10 et 11 au pénétromètre dynamique BEVAC P2 à Granges. Situation: voir fig. 4 p. 8.

APPROCHE EN LABORATOIRE

7.2.3.3. Cellule triaxiale dynamique

Seuls les sables ont pu être testés sur l'appareil de l'"Institut für Grundbau und Bodenmechanik der ETHZ". Les résultats bruts sont donnés dans les tableaux 39 à 41 et les figures 87 à 90 (annexe 6). Nous en tirons les constatations suivantes:

- Il est impossible d'obtenir un degré de saturation de l'échantillon de 100%, car B ne dépasse pas 0,97.
- Les diagrammes contraintes - pression interstitielle révèlent un léger frottement du piston à faible contrainte (diagramme anguleux).
- La surpression interstitielle résiduelle croît très lentement.
- Dès que le déviateur devient négatif, les déformations ne sont plus symétriques et augmentent de cycle en cycle. Le sol se dilate.
- La déformation verticale par cycle n'a pas dépassé 1‰ de la hauteur de l'échantillon.
- Le sable ne s'est pas liquéfié, car la contrainte moyenne initiale était élevée ($p' = 0,14 \text{ MN/m}^2$).

7.2.3.4. Cellule triaxiale standard

Il est malaisé d'effectuer des essais triaxiaux pour des contraintes de confinement σ_3 inférieures à 50 kN/m^2 . La friction du piston dans la cellule n'est plus négligeable (voir détails à l'annexe 6).

Nos points de mesure de la figure 96 sont fortement dispersés; il est illusoire d'y ajuster une droite de régression. Nous ne pouvons donc pas connaître la résistance au cisaillement à l'état permanent τ_{su} pour notre indice de vide "in situ" ($e = 0,691$).

7.3. LIQUEFACTION SOUS L'EFFET DE LA HOULE

7.3.1. METHODE DU CISAILLEMENT MAXIMUM (NATARAJA ET AL. 1983)

I. Conditions d'application et hypothèses de calcul

- Comportement élastique du sol.
- Sol sans cohésion.
- Equipement: SPT₆₀ (Standard Penetrometer Test: dispositif utilisant le 60% de l'énergie potentielle du mouton).
- N_1 : inférieur à 35 coups/30 cm.

A. Critère de résistance du sol

N_1 = nombre de coups/30 cm corrigé pour $\sigma' = 100 \text{ kN/m}^2$

(voir SEED et al. 1983, méthode du nombre critique de coups SPT).

Grâce à des essais triaxiaux, la résistance à la liquéfaction τ_r a été donnée en fonction de N_1 (fig. 98).

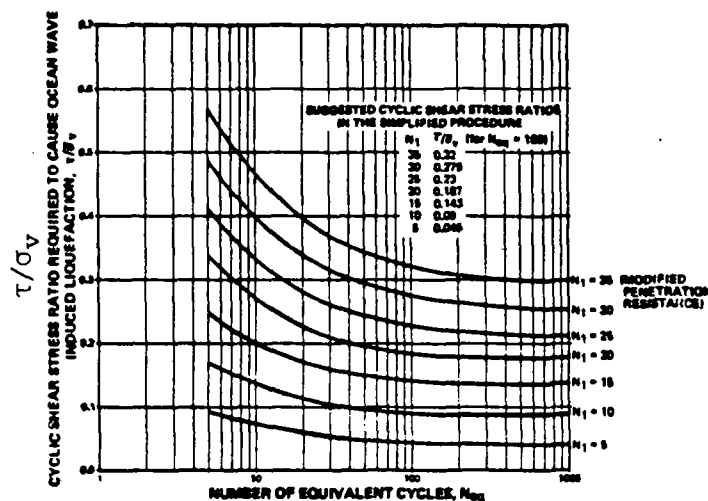


Fig. 98 : Relation entre le nombre équivalent de cycles et le rapport de contrainte τ/σ' (NATARAJA et al. 1983, p. 581)

En première approche, on peut choisir $N_{eq} = 100$. On obtient alors une relation linéaire entre τ_r et N_1

$$\tau_r = 0,009 \cdot N_1 \cdot \sigma'$$

où σ' : contrainte effective à la profondeur considérée.

B. Critère de liquéfaction

La contrainte de cisaillement τ_v induite par le passage d'une vague est calculée en milieu élastique isotrope et homogène (MADSEN 1978, p. 386).

$$\tau_v = \Delta p_b \cdot k \cdot z \cdot e^{-kz} \sin(kx - \omega t)$$

τ_v = équilibre des contraintes normales σ_z et σ_x

$$\sigma_z = -\sigma_x = \Delta p_b \cdot k \cdot z \cdot e^{-kz} \cos(kx - \omega t)$$

τ_v est maximal pour: $\sin(kx - \omega t) = 1$, c'est-à-dire à une distance de $1/4$ de la crête de la vague (voir fig. 44 p.95).

où z = profondeur dans le sol

L = longueur d'onde de la houle

Δp_b = augmentation maximale de pression sur le fond de l'eau =
 $\frac{2A \cdot \gamma_w}{\cosh k \cdot H}$ (théorie de la houle de GERSTNER)

γ_w = poids volumique de l'eau

$2A$ = amplitude de la houle

H = profondeur de l'eau au repos

k = $2\pi/L$

ω = $2\pi/\text{période de la houle}$

En substituant e^{-kz} par son développement en série de Mac Laurin:

$$\tau_v = 3,25 \cdot \Delta p_b \cdot \frac{z}{L} \quad \text{pour } z/L \leq 0,1$$

$$\text{où } \tau_v = 3,25 \cdot 2A \cdot \gamma_w \cdot \frac{z}{L \cdot \cosh(2\pi H/L)}$$

τ_v , σ_z et σ_x sont obtenus à partir des équations différentielles classiques d'équilibre élastique.

$$\frac{\delta \sigma_x}{\delta x} + \frac{\delta \tau_v}{\delta z} = -\frac{\delta p_b}{\delta x}$$

$$\frac{\delta \sigma_z}{\delta z} + \frac{\delta \tau_v}{\delta x} = -\frac{\delta p_b}{\delta z}$$

C. Liquéfaction $\tau_v > \tau_r$

On peut reporter dans un diagramme τ_r , τ_v et $0,5 \tau_v$ en fonction de la profondeur. Si τ_r est inférieur à $0,5 \tau_v$, une analyse plus détaillée est de rigueur. En revanche si τ_r dépasse τ_v , on peut se dispenser de calculs plus sophistiqués.

II. APPLICATION AU DELTA DE GRANGES

1. Hypothèse sur la houle

- Longueur efficace du fetch: 3 km (cf. fig. 1 p. 2)
- Vitesse du vent: 20 m/s (bise) (admis)
- Durée du vent: > 1 h (admis)

2. Hauteur de la houle $2A = 3 \text{ ft} = 0,9 \text{ m}$ (cf abaques de U.S. Army, Coastal Engineering, BRETSCHNEIDER 1970-71).

3. Longueur d'onde $L = 1,56 \cdot T^2 = 19 \text{ m}$, où $T = \text{période} = 3,5 \text{ s}$.

4. Résistance au cisaillement τ_r

$$N_1 = 2 \text{ coups/30 cm (admis)}$$

$$\sigma_1 = (15-10) \cdot 1 = 5 \text{ kN/m}^2 \text{ (hors des limites de validité)}$$

$$\tau_r = 2 \cdot 5 \cdot 0,009 = 0,09 \text{ kN/m}^2$$

5. Contrainte induite par les vagues τ_v

$$H = 5 \text{ m (admis, H hors de la zone de déferlement des vagues)}$$

$$z = 1 \text{ m (profondeur moyenne admise des déformations de Granges)}$$

$$\tau_v = \frac{0,9}{\cosh 2\pi \frac{5}{19}} \cdot 9,8 \cdot 3,25 \cdot 0,05 = 0,53 \text{ kN/m}^2$$

6. Liqéfaction car $\tau_v > \tau_r$ (fig. 99)

Remarque: par comparaison, la bise engendre sur le Léman une houle de $2A = 1,2 \text{ m}$ et de $L = 25 \text{ m}$ pour un fetch de $4,9 \text{ km}$ et une vitesse de la bise de 20 m/s .

Contrainte de cisaillement

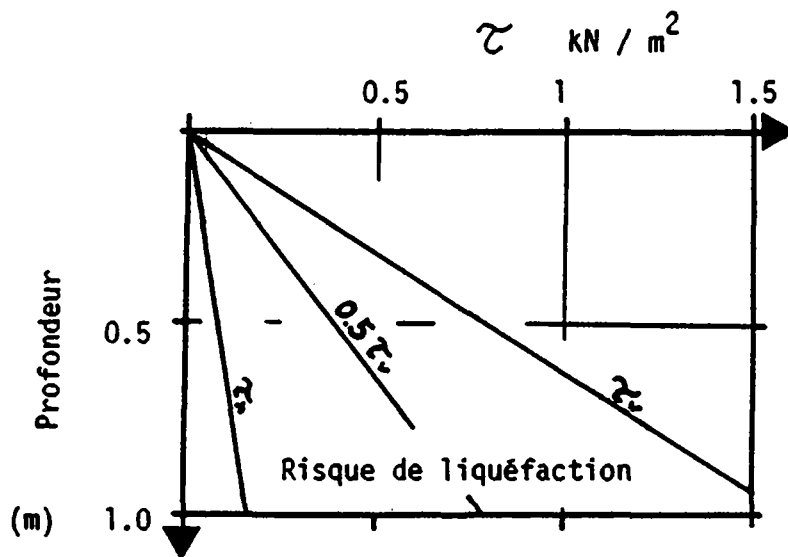


Fig. 99 : Liquéfaction sous l'effet de la houle dans le delta de Granges

7.3.2. METHODE DE L'ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE RESIDUEL (MADSEN 1976)

I. CONDITIONS D'APPLICATION ET HYPOTHESES DE CALCUL

- Comportement élastique du sol.
- Sol sans cohésion.

A. Critère de résistance du sol : ϕ'_r

ϕ'_r = angle de frottement interne effectif résiduel obtenu par des essais de cisaillement habituels (cellule triaxiale, etc.).

B. Critère de liquéfaction : ϕ'_l

$$\sin \phi'_l = \frac{\sigma'_{\max} - \sigma'_{\min}}{\sigma'_{\max} + \sigma'_{\min}}$$

où $\sigma'_{\max} = \sigma'_v + \Delta\sigma'_v$

$\sigma'_{\min} = \sigma'_h - \Delta\sigma'_h$

$\sigma'_v = \gamma'_h \cdot z$

$\sigma'_h = K_o \cdot \sigma'_v$

z = profondeur dans le sol

$K_o = \frac{v}{1-v}$

v = coefficient de Poisson = $(1 - \sin \phi') / (2 - \sin \phi')$

ϕ' = angle de frottement interne effectif

$\Delta\sigma'_v = \frac{2A \cdot k}{\cosh k \cdot H} \cdot \gamma_w \cdot z = \Delta\sigma'_h$

$k = 2\pi/L$

L = longueur d'onde de la houle

H = profondeur de l'eau au repos

γ_w = poids volumique de l'eau

$2A$ = amplitude de la houle

$\sin \phi'_l$ devient par substitution et en posant $\gamma' = \gamma_w$

C. Liquéfaction pour $\phi'_1 > \phi'_r$

II. APPLICATION AU DELTA DE GRANGES

Hypothèses admises pour la houle de Granges

L = 19 m

2A = 0,9 m

H = 5 m

A. Résistance du sol : ϕ'_r

$\phi'_r = 27^\circ (35^\circ)$ (valeurs habituelles pour les limons et les sables)

B. Liquéfaction ϕ_1

$$\phi_1 = \arcsin (1 - 2 \cdot v) + \frac{(1-v) 2\pi \cdot 1,8}{19 \cosh \frac{2\pi}{19} \cdot 5} = 42^\circ (53^\circ)$$

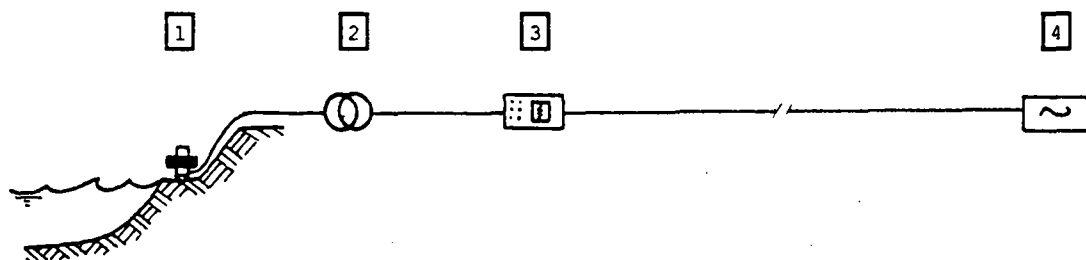
C. Liquéfaction car $\phi_1 > \phi_r$

7.4. LIQUEFACTION SOUS L'EFFET D'UNE CRUE

A. Description du signal émis par une crue

Nous avons enregistré les vibrations émises par les blocs charriés dans le lit de l'Aubonne à Chanivaz lors de plusieurs crues.

Le LMS-EPFL a mis à notre disposition son appareillage fonctionnant comme suit (fig. 100):



- [1] géophone SIK
- [2] transformateur 500 - 10'000 Ω
- [3] enregistreur Hewlett Packard 7414A et 2 préamplificateurs 8803A
- [4] générateur de courant alternatif 220V

Fig. 100: Schéma de mesures dynamiques

La forte crue du 20.12.1982 nous a donné un signal très typé mais faible (tableau 48):

| Position du géophone | Vitesse maximale (mm/s) | Accélération maximale (mm/s ²) | Fréquence dominante (Hz) |
|--|-------------------------|--|--------------------------|
| 1. horizontal et parallèle à la rive | 0.133 | 16 | 19 |
| 2. horizontal et perpendiculaire à la rive | 0.167 | 22 | 22 |
| 3. vertical | 0.056 | 13 | 34 |

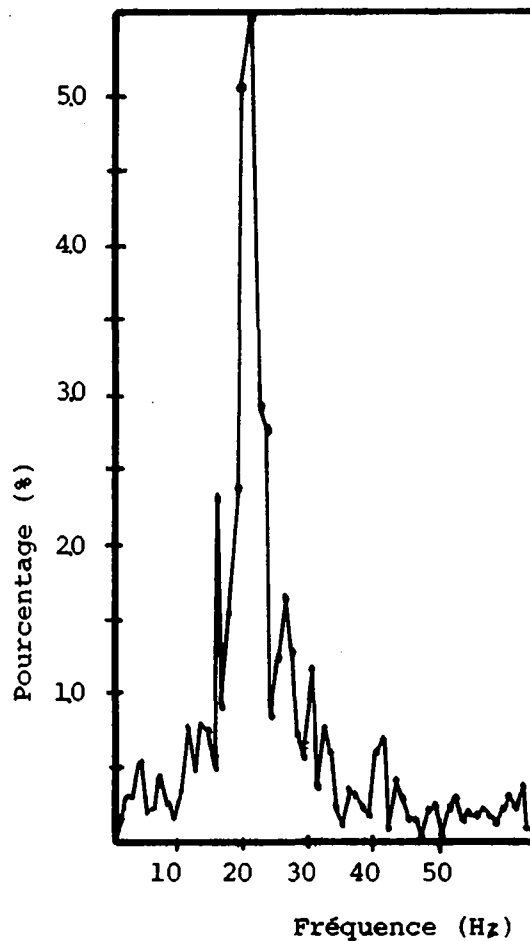
Coordonnées du point de mesure: 520'018/146'415

Date: 20.12.1982 (16 h)

Accélération: 10 mm/s² \approx 1% de l'accélération terrestre g

Tableau 48: Vibrations de la rive de l'Aubonne à Chanivaz pendant une crue

On constate en effet un excellent tri des fréquences, comme le souligne l'analyse spectrale par la transformée de Fourier (programme de l'ISRF-EPFL) (fig.101):



Composante horizontale et perpendiculaire à la rive, de la vitesse du sol

Fig.101: Analyse spectrale de la crue du 20.12.1982 sur l'Aubonne

Nous avons effectué d'autres mesures sur l'Aubonne et sur la Baye de Clarens près de Blonay (coordonnées: 559'090/145'620, altitude: 600 m). Le transport solide était toujours trop faible pour créer des ébranlements supérieurs à 20 mm/s^2 . On obtenait ainsi une intensité MSK de II-III (cf. tableau 16 p. 92).

B. Energie transmise au sol

Le charriage de sédiments représente la sommation infinie de petits sauts, roulements, glissements discrets des éléments composant le lit. Ces mouvements consomment une énergie de l'eau figurée comme perte par la pente de la ligne de charge du cours d'eau.

Le lit reçoit une part importante de cette énergie qui est dissipée sous forme d'ondes de compression et de cisaillement dans le sol.

Le débit solide est une manière de décrire la puissance livrée au lit. BATHURST 1981 propose par exemple la relation suivante pour l'estimation du débit solide Q_s (données expérimentales):

$$Q_s = 4,5 \cdot J^{3/2} (Q_w - Q_c)$$

$$\text{où } Q_c = 0,26 \cdot B \cdot D_{50}^{3/2} \cdot J^{-7/6} \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right)^{5/3} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

Q_c = débit minimum pour lequel les sédiments du lit commencent à bouger

Q_w = débit du cours d'eau (m^3/s)

J = pente de la ligne de charge (-)

B = largeur du cours d'eau (m)

D_{50} = diamètre moyen des sédiments du lit (m)

ρ_s = masse volumique des sédiments du lit (kg/m^3)

ρ_w = masse volumique de l'eau du lit (kg/m^3)

Ce débit solide n'est pas forcément le débit réel, car le charriage dépend des caractéristiques du bassin versant (taille et abondance des sédiments à transporter).

Le cisaillement sur le lit τ_0 est aussi une manière de donner la densité d'énergie livrée au lit (N/m^2 , cf fig. 28 p. 65).

7.5. DÉGAZAGE DES SÉDIMENTS

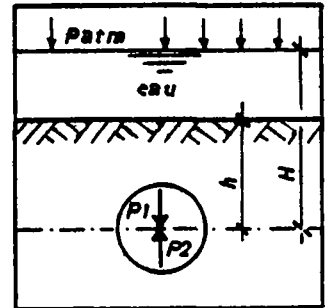
A. Equilibre de la bulle de gaz

Poussée vers le bas: P_1

$$P_1 = (p_{atm} + H \cdot \gamma_w + \gamma' \cdot h + p_i) S_p + P_b$$

Poussée vers le haut: P_2

$$P_2 = (H \cdot \gamma_w + p_{atm} + p_i) S_p + P_a$$



où p_{atm} = pression atmosphérique

γ' = poids volumique apparent du sol
déjaugé

p_i = pression intérieure de la bulle

S_p = surface de la bulle projetée sur un plan horizontal

P_b = poids propre de la bulle (négligeable, car $\gamma_{CH_4} = 5,4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$
à $p = 1,013 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}^{-2}$ et $T = 0^\circ\text{C}$)

P_a = force d'Archimède = $V_b \cdot \gamma_w$

V_b = volume de la bulle

γ_w = poids volumique de l'eau

$p_i = p_e + \frac{4\gamma}{R}$ (loi de Laplace)

p_e = pression extérieure à la bulle

γ = coefficient de tension superficielle gaz-eau (N/m)

Fig. 102 : Définition des symboles (dégazage)

$$P_1 - P_2 = \gamma' \cdot h \cdot S_p - P_a = \gamma' \cdot h \cdot S_p - V_b \cdot \gamma_w$$

B. Discussion

$P_1 - P_2 > 0$: la bulle est écrasée par la surcharge

$P_1 - P_2 = 0$: la bulle est stable

$P_1 - P_2 < 0$: la bulle tente de monter à la surface et se dilate

C. Application numérique

Hypothèses:

Rayon de la bulle: 0,001 m (0,01 m)

Poids volumique apparent du sol déjaugé = 5 kNm^{-3} (admis)

Epaisseur h de terrain surmontant la bulle pour $P_1 - P_2 = 0$:

$$h = \frac{\frac{4}{3} \pi R^3 \cdot \gamma_w}{\pi R^2 \cdot \gamma'} = \frac{4}{3} R \frac{\gamma_w}{\gamma'} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m } (2,7 \cdot 10^{-2} \text{ m})$$

D. Conclusion

Dès que la couverture dépasse trois centimètres, les bulles de gaz restent piégées par les sédiments. Localement, les bulles peuvent franchir des épaisseurs plus grandes, si le sol est remanié par les organismes vivant dans la vase.

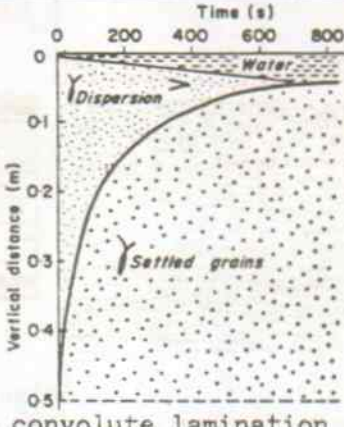
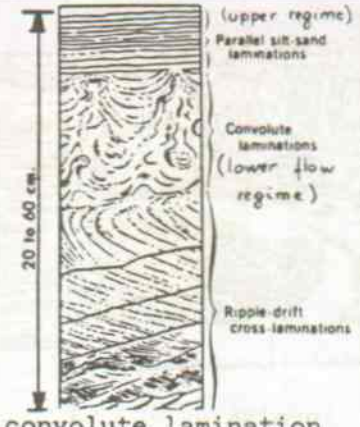
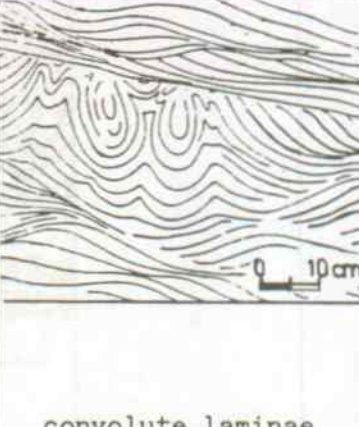
Par migration horizontale, des bulles de plus d'un centimètre de rayon peuvent aussi se former et transpercer la couverture.

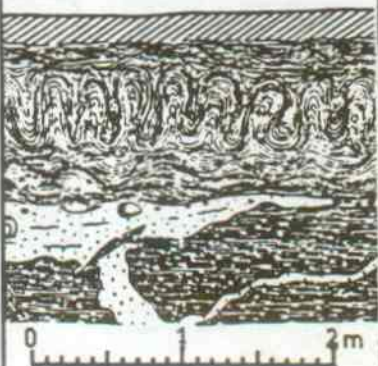
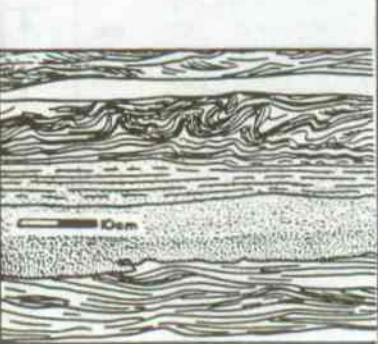
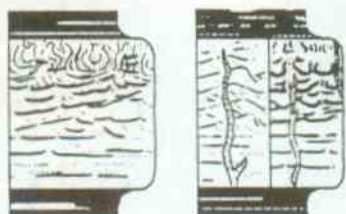
Annexe 8

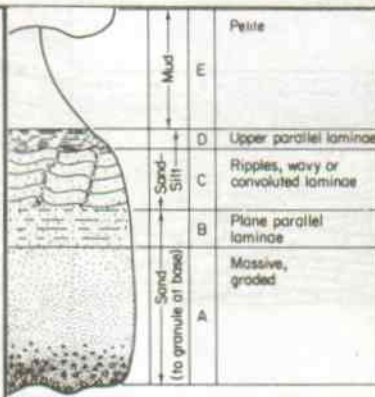
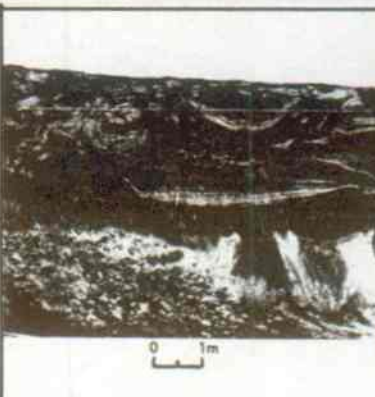
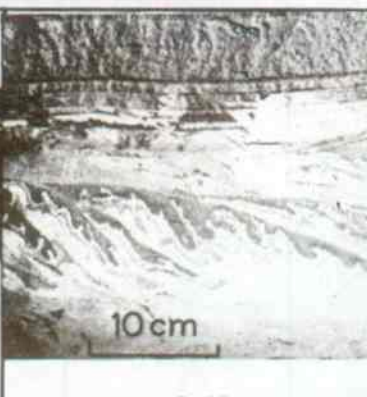
**Inventaire des types de déformations observées dans la nature
et de leur genèse**


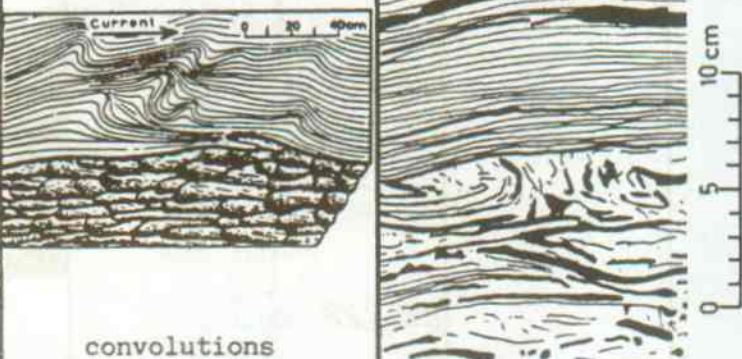
REPERTOIRE DES MECANISMES ET REFERENCES GEOLOGIQUES

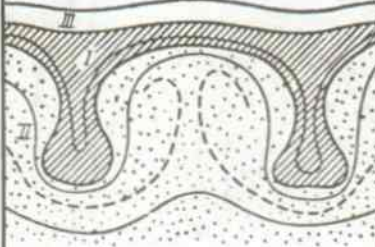
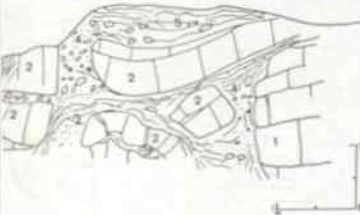
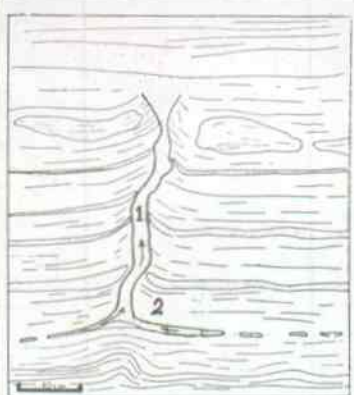
- | | | |
|--------|--|--|
| 1. | Turbulence | Sullwold 1960 p. 365 |
| 2. | Liquéfaction par surcharge appliquée rapidement | Butrym et al. 1964 p. 6 |
| 3.4.5. | Liquéfaction sous l'effet d'un séisme, de la houle ou d'une crue | Butrym et al. 1964 p. 7 Coleman 1969 p. 216 Coleman et Gagliano 1965 p. 139 Dionne 1971 p. 21 Emery 1950 p. 112 Lowe 1975 p. 94 Rust 1977 p. 179 Schlüchter et Knecht 1979 p. 437 Visser et Cunningham 1981 p. 179 Weaver et Jeffcoat 1978 p. 248 |
| 6. | Poinçonnement | Butrym et al. 1969 p. 8 Dzylinski et Kubicz 1975 p. 163 Stewart 1956 p. 155 |
| 7. | Cryoturbation | Campy et Pharissat 1976 p. 21 |
| 8. | Dégazage | Coleman et Gagliano 1965 p. 137 |
| 9. | Bioturbation | Reineck et Singh 1980 p. 163 |
| 10. | Glissement | Blanc 1972 p. 59 Dionne 1971 p. 26 Klaczynska 1960 p. 67 Kuenen 1953 p. 1057 Moulin 1987 fig. 13 Postma 1983 p. 98 Rich 1950 p. 729 Sims 1975 p. 150 |
| 11. | Gonflement des argiles | - |
| 12. | Fluage | Artyushkov 1963 p. 44 |

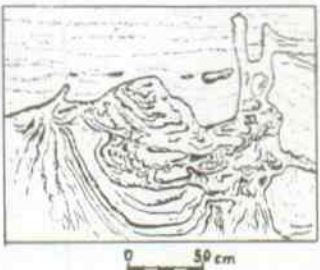
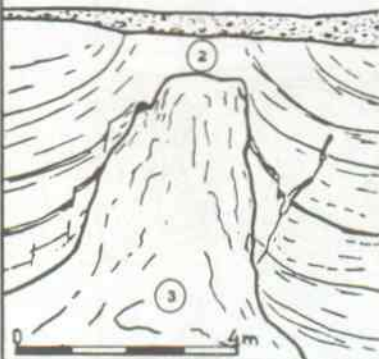
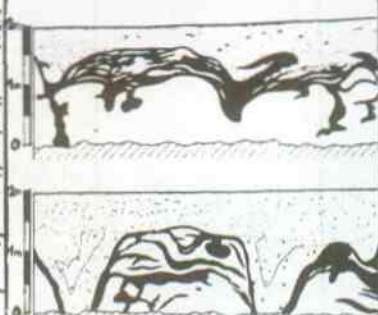
| | | | | |
|--------------------------|---|--|---|---|
| I | Inventaire des types de déformations et de leur genèse | | | 1 |
| A | Déformations impliquant une seule strate (= internes) | | | |
| |  |  |  | |
| Matériau | sand | silty sand | sand | |
| Milieu sédimentaire | deep-sea fan | point bar of Mississippi River | shallow water (Züchesmühle-Urnäsch valley, Switzerland) | |
| Age | - | Actuel | Stampien | |
| Auteur(s) | Allen 1977 | Coleman + Gagliano 1965 p. 139 | Dzulyński + Smith 1963 | |
| Mécanisme(s) proposés(s) | Gravitationally unstable vertical gradients of bulk density can arise during the resedimentation of water-logged normally graded sand beds following liquidization. | A sudden rise in turbulence may mark the abrupt transition between the lower and upper flow regimes. | current forces | |
| Remarques | La liquéfaction du sable provoque son tassement et éventuellement des pillars sans destruction totale de la stratification. | Les laminations sablo-limoneuses supérieures ne peuvent pas se former dans un écoulement torrentiel. | Ces pockets sont plutôt le résultat de vibrations (crues tectoniques ou tempêtes) | |






| | | | | |
|-------------------------|--|---|---|---|
| I | Inventaire des types de déformations et de leur genèse | | | 2 |
| A | Déformations impliquant une seule strate (= internes) | | | |
| |  <p>"involucje"</p> |  <p>convolute bedding</p> |  <p>dish structure, pillar water escape structures</p> | |
| Matériau | argile | silty top of laminated graded sand | sandy silt | |
| Milieu sédimentaire | lac glaciaire (Burgo-Narwia / Poland) | sea bottom (Santa Paula Creek - Ventura, California) | deep-sea fan | |
| Age | Pleistocène | Pliocene | Pennsylvanian | |
| Auteur(s) | Klaczynska 1960 | Kuenen 1953 | Lowe 1975 | |
| Mécanisme(s) proposé(s) | La variation du niveau du lac provoque un glissement (slump) | intensification of ripple mark by hydrodynamic pressure combined with loading in the troughs. | seepage, fluidization or liquefaction due to rapid deposition or seismic shocks | |
| Remarques | O.K. | les convolutions des turbidités résultent du glissement des sédiments pendant leur dépôt. | O.K. | |



| | | | | |
|-------------------------|---|--|--|---|
| I | Inventaire des types de déformations et de leur genèse | | | 3 |
| A | Déformations impliquant une seule strate (= internes) | | | |
| |  <p>interstratal contortions</p> |  <p>ball-and-pillow structures</p> |  <p>slope-failure structure</p> | |
| Matériau | silty sand | sand | varves | |
| Milieu sédimentaire | marine slope | channel fill (Bradley's Pit-Huntley-Ottawa-Canada) | glacio-lacustrine | |
| Age | Silurian | Pleistocene | Late Pleistocene | |
| Auteur(s) | Rich 1950 fig.: Blatt et al. 1980 Bouma 1962 | Rust 1977 | Sims 1975 | |
| Mécanisme(s) proposé(s) | zone of gliding along which the entire mass of overlying sediment crept down a slope and, in the process crumpled the bedding within the siltstones in which the movement was concentrated. | rapid deposition of a large mass of sediments: the increase in the pore water pressure leads to instant liquefaction of the sand. | product of slope failure and slumping | |
| Remarques | O.K. | la haute perméabilité du sable empêche un piégeage de la pression interstitielle. On voit ici plutôt l'effet de secousses (tectonique, crue) | O.K. | |

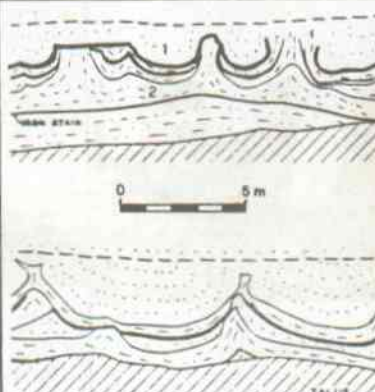
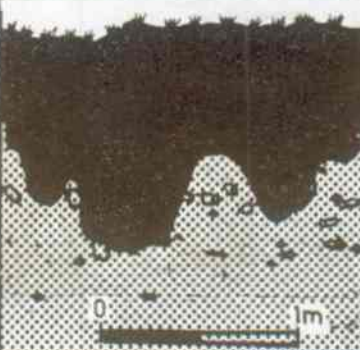
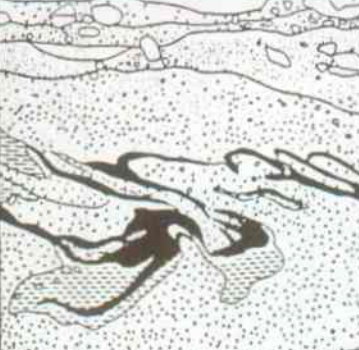







| I | Inventaire des types de déformations et de leur genèse | 4 |
|-------------------------|---|--|
| A | Déformations impliquant une seule strate (= internes) | |
| |  <p>0 ~20cm</p> <p>contorted bedding</p> |  <p>convolutions and flow marks</p> <p>convolute bedding</p> |
| Matériau | <p>sand</p> <p>$d_{50} = 172-196 \text{ m}$</p> <p>$\sigma_{\phi 1} = 0.30-0.32$</p> | <p>clayey silty sand</p> <p>sand</p> |
| Milieu sédimentaire | <p>tidal delta of lagoon</p> | <p>deep-sea fan (Sarsina, Umbria Italy)</p> <p>Platenränder im Gezeitenbereich (Wilhelmshaven-Deutschland)</p> |
| Age | <p>Modern</p> | <p>Tertiary</p> <p>Modern</p> |
| Auteur(s) | <p>Stewart 1956</p> | <p>Ten Haaf 1956</p> <p>Wunderlich 1967</p> |
| Mécanisme(s) proposé(s) | <p>Air heave movement of pockets of trapped air that enters the sand flats during low tide exposure. On the incoming tide, the water table rises in the sand, tending to force the interstitial air upward.</p> | <p>accelerated deposition in the troughs (of the ripples) and expulsion of excess water through the crests</p> <p>Setzungsfließen spontan beim Auftauch durch die Eigenlast der stark wasser-gesättigten Sedimente</p> |
| Remarques | <p>Ces irregular contortions et pockets sont plutôt à attribuer au tassement par surcharge des sédiments dénoyés.</p> | <p>La ride - qui est une structure migrante - possède d'ordinaire une perméabilité élevée.</p> <p>voir Rich 1950 (glissement)</p> <p>Ce sont plutôt des irregular contortions et des pockets.</p> <p>O.K.</p> |

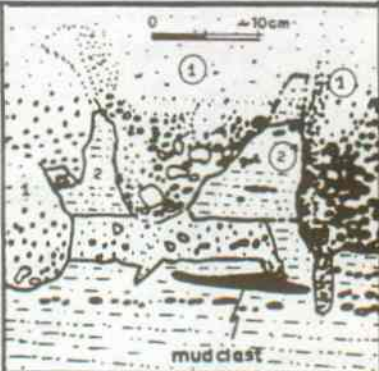
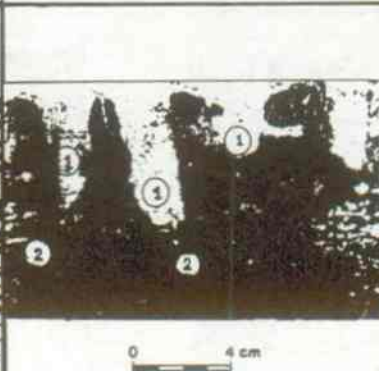
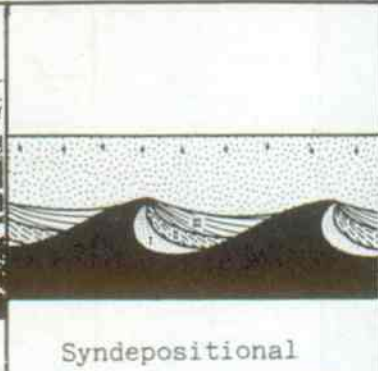

| | | | | |
|----------------------------|---|--|---|---|
| II | Inventaire des types de déformations et de leur genèse | | | 5 |
| B | Déformations impliquant deux ou plusieurs strates | | | |
| |  |  |  | |
| | Marginal subsidence | "bourrage" de couches et rupture de "toit" | sand dyke | |
| Matériaux | I heavy rock (γ_h) II light rock (γ_l) | 1,2 calcarénite, micrite 3,4,5 argiles et craie | 1 sand 2 silt | |
| Milieu sédimentaire | rapid sedimentation | épandage deltaïque à olistostromes (Les Cabots-La Ciotat-F) | eolian silt (Izbica-Poland) | |
| Age | - | Santonien | Pleistocene | |
| Auteur(s) | Artyushkov 1963 | Blanc 1972 | Butrym et al. 1964 p.6 | |
| Mécanisme(s) proposé(s) | Convective instabi- lity if: - $\gamma_h > \gamma_l$ - $(\gamma_h - \gamma_l) \cdot \Delta h > c + \gamma_h \cdot h \cdot \tan \phi$ | Le gonflement des argiles (...) en un volume restreint, amène des injections et des ruptures de "toit" | loading | |
| Remarques | ϕ doit être proche de zéro (= état liquéfié) pour qu'un réajuste- ment hydrostatique ait lieu. | en milieu saturé, le gonflement des mont- morillonites est peu important. Cet aspect chaotique est certai- nement le résultat des glissements pen- dant la formation du delta. | le limon a dû être liquéfié par le pas- sage d'une crue liée à l'arrivée rapide du sable. | |

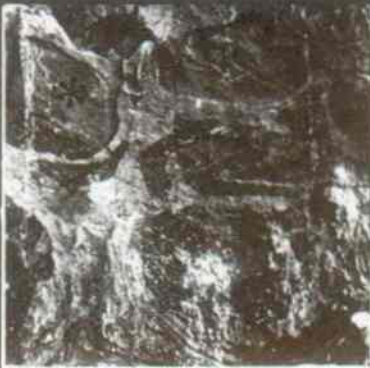
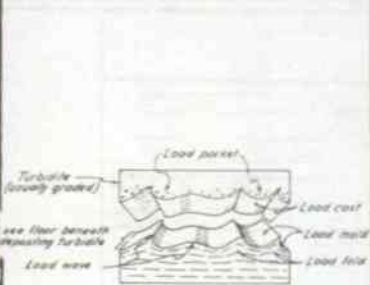
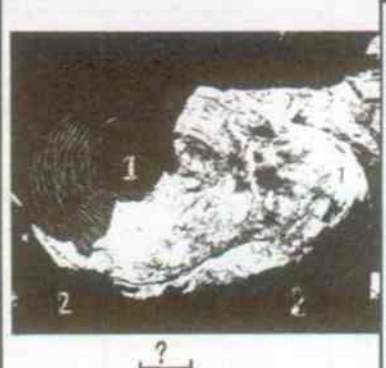
| | | | | |
|---|---|--|---|---|
| II | Inventaire des types de déformations et de leur genèse | | | 6 |
| B Déformations impliquant deux ou plusieurs strates | | | | |
| |  |  |  | |
| | liquefaction structure | clay diapir | figures cunéiformes | |
| Matériaux | <div><div></div> coarse sand</div> <div><div></div> silt</div> | <div><div></div> till</div> <div>② sand + silt</div> <div>③ varved clay</div> | <div><div></div> sables et graviers de terrasse</div> <div><div></div> argile de lessivage</div> <div><div></div> marnes kimmeridgiennes</div> | |
| Milieu sédimentaire | channel (Gaski-Poland) | lake ? (Baniocha-Poland) | Périglaciaire (Rignosot-Ognon-F) | |
| Age | Pleistocene | Pleistocene | Pleistocène (Würm) | |
| Auteur(s) | Butrym et al. 1964 p. 7 | Butrym et al. 1964 p. 8 | Campy + Pharissat 1976 | |
| Mécanisme(s) proposé(s) | spontaneous liquefaction | differential loading or swelling of clay | formes cryopédologiques avec existence transitoire d'une fluidité exceptionnelle de ces formations meubles (...) en présence d'un permafrost dégelé | |
| Remarques | On voit ici l'effet de secousses (crue, tectonique). | Surcharge trop rapide des argiles. | O.K. | |

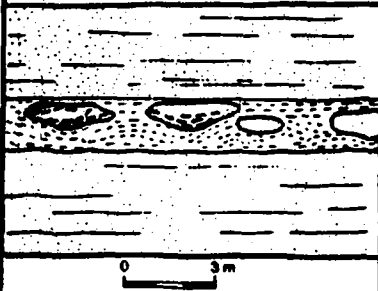


| | | | | |
|-------------------------|--|---|--|---|
| II | Inventaire des types de déformations et de leur genèse | | | 7 |
| B | Déformations impliquant deux ou plusieurs strates | | | |
| |  <p>convolute lamination</p> |  <p>distorted lamination</p> |  <p>involution + pseudonodule</p> | |
| Matériaux | <p>1 sand + silt</p> <p>2 silty clay</p> | <p> sand</p> <p> organics + fine clay</p> | sable fin à moyen limon | |
| Milieu sédimentaire | channel deposit of Brahmaputra River | distributary mouth bar of Mississippi River | delta (Vauvert) (Quebec-Canada) | |
| Age | Modern | Modern | Quaternary | |
| Auteur(s) | Coleman 1969 | Coleman + Gagliano 1965 p. 137 | Dionne 1971 p. 21 | |
| Mécanisme(s) proposé(s) | sudden rise in turbulence during a flood transition between the lower and upper flow regimes. | gas heave | differential loading | |
| Remarques | <p><i>Il n'existe pas d'instabilité du lit entre le régime fluvial et le régime torrentiel.</i></p> <p><i>La crue a dû provoquer la liquéfaction du lit par ébranlements</i></p> | O.K. | Ces déformations s'obtiennent suite à des ébranlements (tectonique, crue, houle) | |

| | | | |
|----------------------------|--|--|---|
| II' | Inventaire des types de déformations et de leur genèse | | 8 |
| B | Déformations impliquant deux ou plusieurs strates | | |
| |  <p>nappe-like fold</p> |  <p>drop structure</p> | |
| Matériaux | sable fin limon | ① shell ② marly limestone | |
| Milieu sédimentaire | lac glaciaire (Pika River) (Quebec-Canada) | shallow epicontinen- tal sea with shoals and sediment ponding depressions (Str. Opolskie-Poland) | |
| Age | Quaternary | Trias | |
| Auteur(s) | Dionne 1971 p. 26 | Dzuleynski + Kubicz 1975 | |
| Mécanisme(s) proposé(s) | slump or slide | vertical readjuste- ment movement with reversed density gradient | |
| Remarques | O.K. | Ce ball-and-pillow est le résultat d'un poinçonnement dans le calcaire argileux sous-consolidé. | |

| | | | | |
|-------------------------|---|--|--|---|
| II | Inventaire des types de déformations et de leur genèse | | | 9 |
| B | Déformations impliquant deux ou plusieurs strates | | | |
| |  <p>contorted strata</p> |  <p>frost-stirred ground involution</p> |  <p>structures en nappes</p> | |
| Matériaux |  sand ($d_{50}=100-340\mu m$)  sandy silt ($d_{50} = 20-79 \mu m$) |  silty sand  gravel |  limon organique  gravillons à matrice limono-sableuse  limon sableux | |
| Milieu sédimentaire | 1. beach 2. estuary (Newport Beach California) | 1. eolian 2. glaciofluvial (Wickford, Rhode Island) | rive de lac (Neuchâtel) (Hauterive-Champréveyres) | |
| Age | Pleistocene | Pleistocene | Quaternaire | |
| Auteur(s) | Emery 1950 | Flint 1971 p. 284 | Moulin 1987 | |
| Mécanisme(s) proposé(s) | silt tended to flow beneath the weight of the denser overlying sand | frost action | après le comblement de chenaux, régression du niveau du lac entraînant le glissement des sédiments de remplissage | |
| Remarques | Ces ball-and-pillow et pockets proviennent d'une liquéfaction lors de l'arrivée rapide du sable (crue) | Ce contact discordant est plutôt l'oeuvre du ruissellement antérieurement au dépôt de loess. | O.K. | |

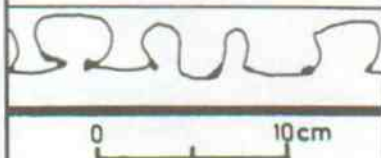
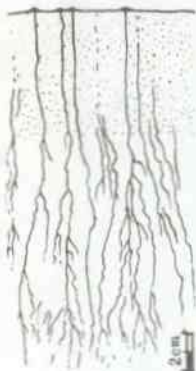

| | | | | |
|-------------------------|---|---|---|----|
| II | Inventaire des types de déformations et de leur genèse | | | 10 |
| B | Déformations impliquant deux ou plusieurs strates | | | |
| |  <p>pocket and pillar structures</p> |  <p>borings</p> |  <p>Syn depositional Deformation structure</p> | |
| Matériaux | ① pebbly sandstone ② pebble-sand-mudstone | ① sand ② hardened mud |  | |
| Milieu sédimentaire | fan-delta Abrioja-Almeria Spain | transgression zone | | |
| Age | Pliocene | Modern | - | |
| Auteur(s) | Postma 1983 | Reineck + Singh 1980 | Sanders 1965 | |
| Mécanisme(s) proposé(s) | local liquefaction due to the conglomeratic mass flow deposit on a steep slope | bioturbation (dwelling structures) | Pointed mud wisps and lee-side cross-laminae differentially deformed during deposition by effects of current drag during sediment fallout from overlying turbulent suspension | |
| Remarques | o.k. | o.k. | le dépôt d'une suspension a lieu dans un milieu calme: la turbulence n'est plus assez intense pour déformer les rides. | |

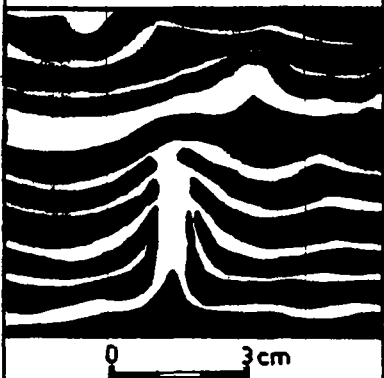
| | | | | |
|-------------------------|---|---|--|----|
| II | Inventaire des types de déformations et de leur genèse | | | 11 |
| B | Déformations impliquant deux ou plusieurs strates | | | |
| |  <p>0 ~ 30 cm</p> <p>involution ball</p> |  <p>load cast</p> |  <p>?</p> <p>roller</p> | |
| Matériaux | *graded gravel and sand silty sand | 1. gravelly sand 2. clay | 1. sand 2. silt | |
| Milieu sédimentaire | proglacial delta (Diessenhofen, Switzerland) | deep-sea fan | (Calvin sandstone US Highway 62) | |
| Age | Quaternary | - | Pennsylvanian | |
| Auteur(s) | Schlüchter and Knecht 1979 | Sullwold 1960 | Visher + Cunningham 1981 | |
| Mécanisme(s) proposé(s) | - heavy flooding: load casting or - difference in height (between channel and level) as well as $\Delta\sigma$ is large: valid demonstration of Artyushkov 1963. | current and load | Rayleigh-Taylor instability if: - upper layer > lower layer - sinusoidal perturbation at layer boundary - viscosity of upper layer > viscosity of lower layer (theory of Ramberg 1968) | |
| Remarques | Ces déformations résultent plutôt d'ébranlements (tectonique, crues ou houle) | o.k. | Ce mécanisme s'applique aux roches enfouies à de grandes profondeurs, dont le comportement est visqueux | |

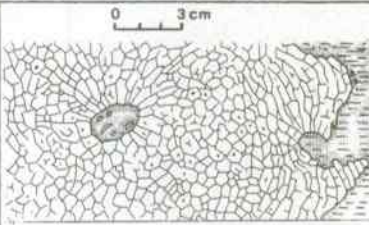
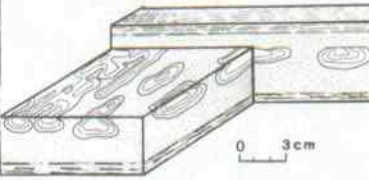
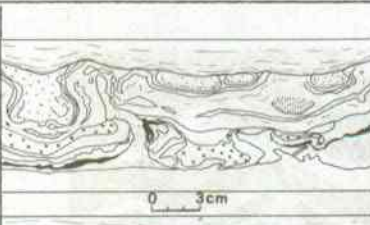
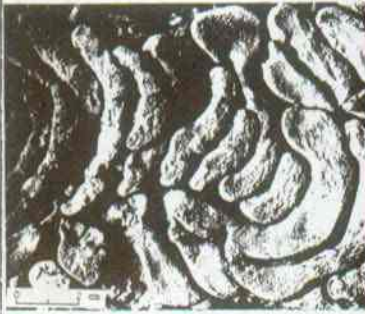




| | | |
|---|--|----|
| II | Inventaire des types de déformations et de leur genèse | 12 |
| B Déformations impliquant deux ou plusieurs strates | | |
| |  <p>ball-and-pillow structure</p> | |
| Matériaux | <div>  coarse biosparite </div> <div>  biomicrite </div> | |
| Milieu sédimentaire | back reef (Coalhills Quarry-Wirksworth-England) | |
| Age | Carboniferous | |
| Auteur(s) | Weaver + Jeffcoat 1978 | |
| Mécanisme(s) proposé(s) | Liquefaction during the passage of earthquake shock waves | |
| Remarques | <p>o.k.</p> <p>(arrivée d'une crue aussi plausible)</p> | |


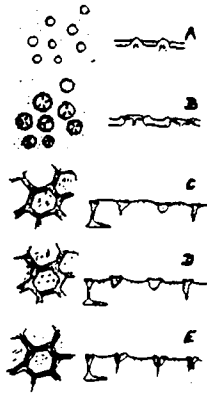
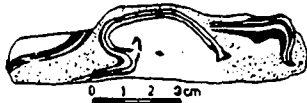







Annexe 9

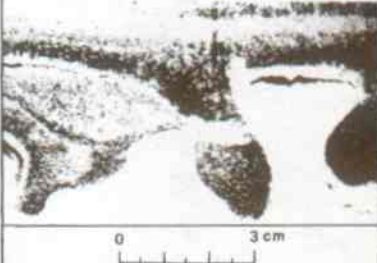
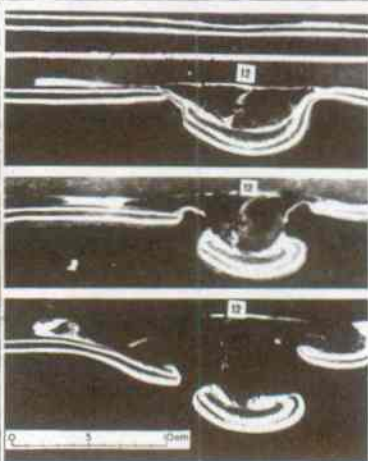
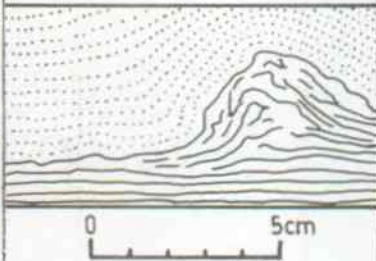






Inventaire des expérimentations géologiques

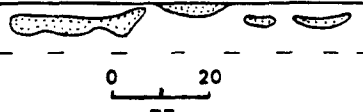
| | | | | |
|------------|---|--|---|---|
| I | Inventaire des expérimentations géologiques | | | 1 |
| A | Déformations impliquant un seul matériau | | | |
| |  <p>Convolute lamination</p> |  <ul style="list-style-type: none"> - cratère - puits de drainage - fente de compaction |  <ul style="list-style-type: none"> - bourrelet - rides symétriques et asymétriques - réseau de rides orthogonales ("ripple marks croisés") | |
| Matériau | Glycerol: $C_3H_5(OH)_3$ | kaolin technique ou vase d'estuaire $\bar{d}=2\mu m$ | sable peu graveleux (0,5 - 7 mm) | |
| Equipement | tank l x b x h 48 x 3 x 29 cm | cuve: a x a x h 200 x 200 x 60 cm | cuves: l x b - 55 x 13 cm - 80 x 57 cm vibreurs | |
| Procédure | The tank was laid on top of a length of square-section steel tubing through which hot water at $T = 47-48^\circ C$ flowed vigorously and steadily | concentration initiale: 60-350 g/l tassement sous propre poids | fortes vibrations horizontales | |
| Auteur(s) | Allen 1977 | Dangeard et al 1964 | Oulianoff 1961 et 1962 | |
| Remarques | Convection possible pour fluide newtonien (résistance au cisaillement nulle) et non pour les sols | Les apports d'argiles sont d'ordinaire très faibles: le dépôt se forme très lentement sans grand tassement | Les vibrations - trop violentes - ne miment pas un phénomène naturel | |

| | | |
|------------|--|---|
| I | Inventaire des expérimentations géologiques | 2 |
| A | Déformations impliquant un seul matériau | |
| |  <p>Contorted bedding</p> | |
| Matériau | dark and light fine sand | |
| Equipement | cylindre: \emptyset x h 10 x 33 cm | |
| Procédure | tidal cycle: water is introduced from below and from above: rise of air pockets through the sediment | |
| Auteur(s) | Stewart 1956 | |
| Remarques | <i>Les mêmes déformations peuvent être créées par l'émersion des sables: tassement sous poids propre</i> | |

| | | | | |
|------------|--|---|---|---|
| I | Inventaire des expérimentations géologiques | | | 3 |
| B | Déformations impliquant deux ou plusieurs matériaux | | | |
| |  <p>0 3 cm</p> <p>polygonal pattern</p>  <p>0 3 cm</p> <p>elongated structures</p> |  <p>0 3 cm</p> <p>diapiric intrusion between lobes of down-sinking material</p> |  <p>0 3 cm</p> <p>irregular polygonal outlines</p> | |
| Matériaux |  plaster of Paris  clay |  fine sand  clayey silt | alternative layer of clay and plaster of Paris + clay | |
| Equipement | flume | tank | flume | |
| Procédure | minimal shock by deposition of plaster of Paris | deformation usually started spontaneously with deposition of a "critical layer" or triggered off by a slight shock | slight shock | |
| Auteur(s) | Anketell et al 1968 | Anketell et al 1969 | Bocacz et al 1968 | |
| Remarques | <p>déformations originale n'ayant pas leur équivalent dans la nature</p> <p>l'échelle des déformations est très réduite par rapport aux exemples naturels</p> | | | |

| | | | | |
|------------|---|---|--|---|
| I | Inventaire des expérimentations géologiques | | | 4 |
| B | Déformations impliquant deux ou plusieurs matériaux | | | |
| |  |  |  | |
| | trail and underplight | diapir and ridges (successive stages) | slump-like disturbance | |
| Matériaux |  sealing wax with sand  pitch |  plaster of Paris  fine clay |  heavy suspension (cement, sand, plaster)  stratified plaster of Paris  fine clay | |
| Equipement | cardboard box | tray | flume | |
| Procédure | wax and pitch were slowly heated from above downwards | tray slightly tittled or jarred | heavy suspension is released as a turbidity current | |
| Auteur(s) | Deeley 1916 | Dzulyński 1963 | Dzulyński and Radomski 1966 | |
| Remarques | <i>poinçonnement dans un matériau devenu liquide</i> | <i>liquéfaction grâce aux secousses dont l'intensité n'est pas connue</i> | <i>poinçonnement créant de petites irrégula- rités de la strati- fication malgré l'usage du ciment</i> | |

| | | | | |
|------------|--|--|---|---|
| I | Inventaire des expérimentations géologiques | | | 5 |
| B | Déformations impliquant deux ou plusieurs matériaux | | | |
| |  <p>flame structure</p> |  <p>pseudo-nodule</p> |  <p>convolute-type structure</p> | |
| Matériaux |  sand  clay |  coarse sand  mud |  sand  mud | |
| Equipement | jar | tank rubber hammer electric motor | 2 flumes l x b x h 1) 457 x 37 x 61 cm 2) 1372 x 46 x 61 cm | |
| Procédure | differential loading | local burde of sand sinks down under influence of vibration | differential loading (other experimentations with slumpings, drag, etc.) | |
| Auteur(s) | Dzulyński + Walton 1965 | Kuenen 1958 | McKee et al 1969 | |
| Remarque | poinçonnement (ordre de grandeur de la surcharge non mentionné) | aucune information sur l'intensité des vibrations | approche morphologique (sans prises de mesures) | |

| | | |
|------------|--|---|
| I | Inventaire des expérimentations géologiques | 6 |
| B | Déformations impliquant deux ou plusieurs matériaux | |
| |  <p>ball-and-pillow-like structures</p> | |
| Matériaux | <div> <div>calcite sand d = 125-250 μm</div> <div>lime mud d = 2 + 8 μm</div> </div> | |
| Equipement | tank 1 x b x h 29 x 19 x 18 cm | |
| Procédure | striking with a hammer on the support of the tank | |
| Auteur(s) | Weaver + Jeffcoat 1978 | |
| Remarques | <i>Cas de charge trop violent. Les déformations sont minuscules.</i> | |

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AARTOLAHTI, T. (1987), Contorted structures in quaternary glaciofluvial deposits in southern Finland, *Ann. Acad. Sc. Fennicae*, A III, 143, 51 p.
- ALLEN, J.R.L. (1968), The diffusion of grains in the lee of ripples, dunes, and sand deltas, *Jour. Sed. Petrol.*, No. 38, pp. 621-633
- ALLEN, J.R.L. (1977), The possible mechanics of convolute lamination in graded sand beds, *Geol. Soc. Lond., J. Vol.* 134, pp. 19-31
- ALTINAKAR, M., (1988), Weakly depositing turbidity currents on small slopes, Ph.D. Thesis N° 738, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- ANKETELL, J.M. and DZULYNSKI, S. (1968), Transverse deformational patterns in unstable sediments, *Roczn. Polsk. Tow. Geol.*, No. 38-4, pp. 411-416
- ANKETELL, J.M. and DZULYNSKI, S. (1968), Patterns of density controlled convolutions involving statistically homogeneous and heterogeneous layers, *Roczn. Polsk. Tow. Geol.*, No. 38, pp. 401-409
- ANKETELL, J.M., CEGLA, J. and DZULYNSKI, S. (1969), Unconformable surfaces formed in the absence of current erosion, *Geol. Romana* No. 8, pp. 41-46
- ANKETELL, J.M., CEGLA, J. and DZULYNSKI, S. (1970), On the deformational structures in systems with reversed density gradients, *Roczn. Polsk. Tow. Geol.*, No. 40, pp. 3-30
- ARAGNO, M. (1985), La décharge de déchets urbains: un milieu biologique engendré par l'homme, *Bollettino della Soc. Ticinese di Scienze Naturali*, No. 73, pp. 37-49
- ARTYUSHKOV, Ye.V. (1963), Possibility of convective instability in sedimentary rocks and the general laws of its development, *Earth Sci. Sec.*, pp. 26-28
- BARNDORFF-NIELSEN, O. (1977), Exponentially decreasing distributions for the logarithm of particle size, *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, 353, pp. 401-419
- BLANC, J.J. (1972), "Slumpings" et figures sédimentaires dans le Crétacé supérieur du bassin du Beausset, France, *Sediment. Geol.*, Vol. 7, No. 1, pp. 47-64
- BLANCK, J.P. et KOROSSEC, B.P. (1979), Etudes des courbes granulométriques globales (0,002-2 mm) par l'analyse factorielle des correspondances. Application aux formations superficielles des "Llanos centrales" du Vénézuëla, *Rev. de géomorphologie dynamiques*, No. 18,1, pp. 1-13
- BLATT, H., MIDDLETON, G. and MURRAY, R. (1980), *Origin of sedimentary rocks*, Prentice-Hall J., Englewood Cliffs, New Jersey, 782 p.
- BOCACZ, K., DZULYNSKI, S., GRADZINSKI, R. and KOSTECKA, A. (1968), Origin of crumpled limestone in the Middle Triassic of Poland, *Roczn. Polsk. Tow. Geol.*, No. 38-2-3, pp. 384-394
- BOSSONEY, C., BALISSAT, M., STUDER, J. and ZINGGEN (1987), Earthquake resistance of a rockfill dam. Intern. Conf. on Rec. Adv. in Geot. Earthqu. Eng. and Soil Dyn., I., Rolla, Missouri, pp. 441-445

- BOUMA, A.H. (1962), *Sedimentology of some Flysch deposits*, Elsevier, Amsterdam/New York, 168 p.
- BRENCHLEY, P.J., and NEWALL, G. (1977), The significance of contorted bedding in upper Ordovician sediments of the Oslo region, Norway, *J. Sediment. petro. (USA) (JSPEAK)*, Vol. 47, No. 2, pp. 819-833
- BRETSCHNEIDER, C.L. (1970-71), US Army Coast Eng. Res. Center, . In: Lafitte R., 1976, *Travaux hydrauliques, cours*, IENER-EPFL
- BRIEL, A. (1962), *Géologie de la région de Lucens (Broye)*, Thèse, Birkhäuser, Bâle, 85 p.
- BRINDLEY, G.W. and BROWN, G. (1980), *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification*. Mineralogical Society, 5, London, 495 p.
- BUTRYM, J., CEGLA, J., DZULYNSKI, S., and NAKONIECZNY, S. (1964), New interpretation of "Periglacial structures", *Folia Quaternaria*, No. 17, pp. 1-34
- CAILLEUX, J.P., et TRICART, J. (1959), *Initiation à l'étude des sables et des galets*, t. I, C.D.U, Paris, 376 p.
- CAMPY, M. et PHARISAT, A. (1976), Manifestations périglaciaires dans la vallée de l'Ognon, *Ann. Sc. de l'Univ. Besançon, Géologie*, 3, 26, pp. 19-29
- CHOWDHURY, R.M. and ATHANASIOU-GRIVAS, D. (1982): Probabilistic model of progressive failure of slopes, *J. of Geotechn. Eng. Div. ASCE*, Vol. 108, No. GT6, pp. 803-819
- COLEMAN, J.M. (1969), *Brahmaputra River: Channel processes and sedimentation*, *Sediment. Geol.* 3, pp. 129-239
- COLEMAN, J.M. and GAGLIANO, Sh.M. (1965), *Sedimentary structures: Mississippi River Deltaic Plain*, In: *Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation*, *SEPM Spec. Publ.* 12, pp. 133-148
- COMMITTEE ON EARTHQUAKE ENGINEERING (1985), *National Research Council, Report No. CETS-EE-001, Liquefaction of soils during Earthquakes*, National Academy Press, Washington D.C., 228 p.
- CORTE, A. (1962), The frost behaviour of soil: laboratory and filed data for a new concept. *USACRREL Research rept.* No. 85
- DANGEARD, L., MIGNIOT, C., LARSONNEUR, C. et BAUDET, P. (1964), *Figures et structures observées au cours du tassement des vases sous l'eau*. *C.R. Acad. Sci. Paris*, No. 258, pp. 5935-5938
- DEELEY, R.M. (1916), *Trail and Underplight*, *Geol. Mag.*, Decade VI, vol. iii, pp. 2-5
- DIONNE, J.Cl (1971), *Contorted structures in unconsolidated Quaternary deposits, Lake Saint-Jean and Saguenay Regions Quebec*, *Rev. Geogr. Montr.* XXV, I, pp. 5-33
- DOEGLAS, D.J. (1946), *Interpretation of the results of mechanical analyses*, *Journ. Sed. Petr.*, No. 16, pp. 19-40
- DYSLI, M. (1983), *Normalisation de l'essai de gonflement au gel*, *Dep. Féd. de l'Intérieur, Recherche* 6/82, 67 p.

DZULYNSKI, S. (1963), Polygonal structures in experiments and their bearing upon some periglacial phenomena, Bull. de l'Académie polon. des sciences (Série des sc. géol. et géogr.), XI, 3, pp. 145-150

DZULYNSKI, S. and KUBICZ, A. (1975), Storm accumulations of brachiopod shells and sedimentary environment of the Ferebratula beds in the Muschelkalk of upper Silesia (Southern Poland), Roczn. Polsk. Tow. Geol., No. 45-2, pp. 157-169

DZULYNSKI, S. and WALTON, E.K. (1965), Sedimentary features of Flysch and greywackes, Developments in Sedimentology No. 7, Elsevier, Amsterdam, 300 p.

DZULYNSKI, S. and RADOMSKI, A. (1966), Experiments on bedding disturbances produced by the impact of heavy suspensions upon horizontal sedimentary layers, Acad. Poln. Sci. Bull., Sér. Sci. Géol. et Géogr., 14,4, pp. 227-230

DZULYNSKI, S. and SMITH, A.J. (1963), Convolute lamination, its origins, preservation, and directional significance, J. Sediment. Petrol., No. 33, pp. 616-627

EINSELE, G. (1963), "Convolute bedding" und ähnliche Sedimentstrukturen im rheinischen Oberdevon und anderen Ablagerungen, J. Jb. Paläont., Abh. 116, pp. 162-189, Stuttgart

ELIOTT, R.E. (1965), A classification of subaqueous sedimentary structures based on rheological and kinematical parameters. Sedimentology, No. 5, pp. 193-209

FINN, W.D.L., LEE, K.W. and MARTIN, G.R. (1976), An effective stress model for liquefaction, ASCE Convention, Preprint 2752, Philadelphia, pp.169-198.

FLINT, R.F. (1971), Glacial and Quaternary Geology, John Wiley and sons Inc., New York, 892 p.

FOLK, R.L. (1965), A review of grain-size parameters, Sedimentology, No. 6, pp. 73-93

FRIVIK, P.E., JANBU, N, SAETERSDAL, R. and FINBORUD, L.I. (Ed.) (1981), Ground freezing 1980, Engineering Geology, No. 18, 1-4, 410 p.

GERMAN, R., MADER, M., and KILGER, B. (1979), Glacigenic and glaciofluvial sediments, typification and sediment parameters, 127-143, in: Moraines and Varves, Ed. Ch. Schlüchter, Balkema, Rotterdam

GIBBS, R.J., MATHEWS, M.D. and LINK, D.L. (1971), The relationship between sphere size and settling velocity, J. sedim. Petrol. No. 41, pp. 7-18

GOLDRING, R. (1979), Trace fossils in sedimentology. In: 3e Cycle Rom. Sc. Terre Fribourg, Sédimentation détritique, pp. 124-192

GRAF, H.W. (1971), Hydraulics of Sediment Transport, Mc-Graw-Hill Book Company, 513 p.

HARR, M.E. (1981), Mécanique des milieux formés de particules, Presses Polytechniques Romandes, 514 p.

HEDBERG, H.D. (1936), Gravitational compaction of clays and shales, Am. Jour. Sc., 5, 31, pp. 241-297

HOLLAND, C.H. (1959), On convolute bedding in the lower Ludlovian rocks of Radnorshire, Geol. Mag., No. 96, pp. 230-236

HOLTZ, R.D., and KOVACZ, W.D. (1981), An introduction to geotechnical engineering, Prentice-Hall

van HUESEN, D. (1979), Granulometrische Untersuchungen zur Genese von Moränen im Salzkammergut, Oesterreich, 115-119, in: Moraines and Varves, Ed. Ch. Schlüchter, Balkema, Rotterdam

KABBAJ, M. (1981), Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et du gonflement anisotropes d'une bentonite compactée. Thèse, Institut national polytechnique de Grenoble

KAPLAR, C.W. (1974), Freezing test for evaluating relative frost susceptibility of various soils, U.S. Army Cold Regions Research and Eng. Lab. Techn. rept. 250, 37 p.

KAYE, C.A. and POWER, W.R. (1954), A flow cast of very recent date from Northeastern Washington. Am. Journal of Sciences, Vol. 252, pp. 309-310

KIENE, R.P. and CAPONE, D.G. (1985), Degassing of pore water methane during sediment incubations, Applied and Envir. Microbiology, 49, 1, pp. 143-147

KITTLEMAN, L.R. Jr. (1964), Application of Rosin's distribution to size-frequency analysis of clastic rocks, Journ. Sed. Petrol. 34, pp. 483-502

KLACZYNSKA, K. (1963), Bipartition des argiles à varves au bord de Bugo-Narew, Biul. Perygl. todz, 7, pp. 65-71

KOVAC, G. (1981), Seepage Hydraulics, Dev. in water science, 10, Elsevier, Amsterdam, 730 p.

KUENEN, P.H. (1953), Significant features of graded bedding. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., No. 37, pp. 1044-1066

KUENEN, Ph. H. (1958), Experiments in Geology, Trans. Geol. Soc. Glasgow, 23, pp. 1-28

LAMBE, T.W. and WHITMAN, R.V. (1969), Soil Mechanics, John Wiley, 553 p.

LE RIBAULT, L. (1979), Exoscopie et endoscopie des quartz d'origine détritique, 22 p., in: Sédimentation Détritique II, 3e Cycle Romand des Sciences de la Terre, Fribourg, mars 1979

LEWIS, K.B. (1971), Slumping on a continental slope included at 1-4°, Sedimentology, No. 16, pp. 97-110

van LOON, A.J. and WIGGERS, A.J. (1975), Holocene lagoonal silts (formerly called "sloef") from the Zuiderzee, Sediment. Geol., Vol. 13, No. 1, p. 47-55

LOWE, D.R. (1975), Water escape structures in coarse-grained sediments, Sedimentology, No. 22, pp. 157-204

LOWE, J. and JOHNSON, T.C. (1960), Use of back pressure to increase degree of saturation of triaxial test specimens, in: ASCE, June 1960, Research Conference on shear strength of cohesive soils, Colorado, Boulder

McKEE, E.D., REYNOLDS, M.A. and BAKER, C.H. (1962), Laboratory studies on deformation in unconsolidated sediment, U.S. Geol. Surv. Profess. Papers 450 D, D151-D155

McKEE, E.D., REYNOLDS, M.A. and BAKER, C.H. (1962), Experiments on intraformational recumbent folds in crossbedded sand, U.S. Geol. Surv. Profess. Papers 450 D, D155-D160

McKEE, E.D. and GOLDBERG, M. (1969), Experiments on formation of contorted structures in mud, Geol. Soc. Am. Bull, No. 80, pp. 231-244

MACAR, P. (1948), Les pseudonodules du Famennien et leur origine. Ann. Soc. Geol. Belg, Bruxelles, No. 72, pp. 47-74

MADSEN, F.T. (1976), Quelldruckmessung an Tongesteinen und Berechnung des Quelldrucks nach der DLVO-Theorie, Mitt. des Inst. für Grundbau und Boden-mech, ETHZ, No. 108, 65 p.

MADSEN, O.S. (1978), Wave-induced pore pressures and effective stresses in a porous bed, Géotechnique, No. 28, 4, pp. 377-393

MAGNAN, J.-P. et DEROY, J.-M. (1980), Analyse graphique des courbes de consolidation oedométrique, Bull. liais. Labo. P. et Ch., No. 109, pp. 53-56

MEAD, W.J. (1940), Folding, Rock flowage and foliate structures, Jour. Geology, V. 48, pp. 1007-1021

MITCHELL, J.K. (1960), Fundamental aspects of thixotropy in soils, J. Soils Mech. Found. Div., Vol. 86, No. SM3, pp. 19-52

MOULIN, B. (1987), Les figures de déformation plastique de la séquence littorale tardiglaciaire d'Hauterive-Champréveyres (Lac de Neuchâtel, Suisse). Musée Cantonal d'Archéologie de Neuchâtel, rapport non publié, 44 p.

OBONI, F. (1985), Modélisation des pentes instables: approche probabiliste, Annales de l'Inst. Techn. du Bât. et des Trav. Publ., No. 435, pp. 44-52

OBONI, F., BOURDEAU, P.L. et BONNARD, Ch. (1984), Probabilistic analysis of Swiss landslides. IV Int. Symp. on Landslides, Proceed., Toronto, II, Publication No. 98 des LMS, LMR de l'EPFL

OTTO, G.H. (1939), A modified logarithmic probability Graph for the Interpretation of mechanical analysis of sediments, Journ. Sedim. Petrol. No. 9, pp. 62-76

OULIANOFF, N. (1961), Rides sous-marines (ripple marks), Un problème de sédimentologie, Bull. des lab. de géol, minéral, géophys. et du Musée géol. de l'Univ. de Lausanne, No. 130, 12 p.

OULIANOFF, N. (1962), Quelques exemples démonstratifs de ripple marks simples et croisés, Bull. des lab. de géol, minéral, géophys. et du Musée géol. de l'Univ. de Lausanne, No. 136, 4 p.

PARKS, J.M. (1983), Eigenshape analysis of unconsolidated sandstones from New Jersey and lithified sandstones from Pennsylvania, G.S.A. Meetings

PARRIAUX, A. (1979), Penecontemporaneous deformation structures in a Pleistocene periglacial delta of western Swiss Plateau. In: Proc. of an Inqua Symp. on genesis and lithology of quat. deposits: Moraines and Varves, Ed. Schlüchter Ch., Balkema, Rotterdam, pp. 421-432

- PARRIAUX, A. (1981), Contribution à l'étude des ressources en eau du bassin de la Broye, Thèse N° 393, EPFL
- PASSEGA, R. (1964), Grain size representation by CM patterns as a geological tool, J. Sediment. Petrol. 34, 830-847.
- PETTIJOHN, F.J., POTTER, P.E. and SIEVER, R. (1973), Sand and Sandstone, XVI, Springer, 618 p.
- PLESSMANN, W. (1961), Strömungsmarken in klastischen Sedimenten und ihre geologische Auswertung; Untersuchungsergebnisse im Oberharzer Kulm und im westalpinen Flyschbecken von San Remo, Geol. Jb., No. 78, pp. 503-566
- POSTMA, G. (1983), Water escape structures in the context of a depositional model of a mass flow dominated conglomeratic fan-delta (Abrioja Formation, Pliocene, Almeria Basin, SE Spain), Sedimentology, No. 30, pp. 91-103
- POTTER, P.E. and PETTIJOHN, F.J. (1977), Paleocurrents and Basin Analysis. 2nd corrected and up-dated, Ed. Springer, 425 p.
- PRAKASH, S. (1981), Soil dynamics, Mac-Graw Hill, 426 p.
- RAMBERG, H. (1968), Instability of layered systems in the field of gravity, I, II, Phys. Earth Planet. Inter. 1, pp. 427-447, 448-474
- READING, H.G. (1978), Sedimentary Environments and Facies, Blackwell scient. publ., 557 p.
- REED, W.E., LE VEVER, R., and MOIR, G.J. (1975), Depositional environment interpretation from settling-velocity (Psi) distributions, Bull. Geol. Soc. Am., No. 86, pp. 1321-1328
- REINECK, H. and SINGH, I. (1973), Depositional sedimentary Environment, Springer-Verlag, Berlin, 439 p.
- RETTGER, R.E. (1935), Experiments on soft-rock deformation, Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., Vol. 19, No. 2, pp. 271-292
- RICH, J.L. (1950), Flow markings, groovings and intrastratal crumplings as criteria for the recognition of slope deposits, Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geolog., No. 34, pp. 717-741
- RICHART, F.E., Jr. (1962), Foundation Vibrations, Trans. ASCE, Vol. 127, Part I, pp. 863-898
- RIVIERE, A. (1952), Sur la représentation graphique de la granulométrie des sédiments meubles. Interprétation de courbes et applications, Bull. Soc. Géol. France, No. 61, II, pp. 145-154
- RIVIERE, A. (1977), Méthodes granulométriques. Technique et interprétation. Masson, Paris, 170 p.
- RUPKE, N.A. (1978), Deep Clastic Sear, In: Reading H.G. (Ed.), Sedimentary Environments and Facies, Blackwell, pp. 372-415
- RUST, B.R. (1977), Mass flow deposits in a Quaternary succession near Ottawa, Canada; diagnostic criteria for subaqueous outwash, Can. J. Earth Sci., Vol. 14, No. 2, pp. 175-184
- SANDER, J.E. (1965), Primary sedimentary structures formed by turbidity currents and related sedimentation mechanisms, in: Primary sedimentary

structures and their hydrodynamic interpretation, SEPM Spec. Publ. No. 12, pp. 192-219

SAEGESSER, R. und MAYER-ROSA, D. (1978), Erdbebengefährdung in der Schweiz, Schweiz. Bauzeitung, No. 7, pp. 107-128

SCHLUECHTER, C. (1976), Geologische Untersuchungen im Quartär des Aaretals südlich von Bern (Stratigraphie, Sedimentologie, Paläontologie), Mat. Geol. Karte Schweiz, Neue Folge, 148.

SCHLUECHTER, C. (1978), Guidebook of Symposium INQUA, ETH Zurich, pp. 92-112

SCHLUECHTER, C. and KNECHT, U. (1979), Intrastratal contortions in a glacio-lacustrine sediment sequence in the eastern Swiss Plain, In: Proc. of an Inqua Symp. on genesis and lithology of quat. deposits: Moraines and Varves, Ed. Schlüchter Ch., Balkema, Rotterdam, pp. 433-441

SIMS, J.D. (1975), Determining earthquake recurrence intervals from deformational structures in young lacustrine sediments. Tectonophys., 29, pp. 141-152

SPEED, H.B. (1976), Evaluation of soil liquefaction effects on level ground during earthquakes, ASCE Nat. Conv. Philadelphia, Preprint 2752, p. 1-104

SPEED, H.B., MARTIN, P.P. and LYSMER, J. (1976), Pore-water pressure changes during soil liquefaction, J. Geot. Eng. Div. ASCE, No. 102, GT4, pp. 323-346

SELLEY, R.C., and SHEARMAN, D.J. (1962), The experimental production of sedimentary structures in quicksands, Proc. Geol. Soc. London, No. 1599, pp. 101-102

SELLEY, R.C., SHERMAN, D.J., SUTTON, J. and WATSON, J. (1963), Some underwater disturbances in the Torridonian of Skye and Raasay, Geol. Mag., No. 100, pp. 224-244

SLY, P.G., THOMAS, R.L. and PELLETIER, B.R. (1983), Interpretation of moment measures derived from water-lain sediments, Sedimentology, No. 30, pp. 219-233

SRIDHARAN, A. and JAYADEVA, S.M. (1982), Double layer theory and compressibility of clays, Géotechnique, No. 32,2, pp. 133-144

STEWART, H.B. jr. (1956), Contorted sediments in modern coastal lagoon explained by laboratory experiments, Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., No. 40,1, pp. 153-161

STUDER, J. (1977), Dimensionierung von Staudämmen gegen Erdbebenwirkung, Mitt. der Schweizer. Ges. für Boden- und Felsmechanik, 97, 1-7

SULLWOLD, H.H. jr. (1960), Load cast terminology and origin of convolute bedding: Further comments, Bull. Geol. Soc. Amer., No. 71, pp. 635-636

SUTER, P. (1980), Cours de transfert de chaleur et de masse, Institut de thermique appliquée, EPFL, Lausanne

TEN HAAF, E. (1956), The significance of convolute lamination, Geol. Mijnbouw, No. 18, pp. 188-194

TERZAGHI, K. et PECK, R.B. (1969), Mécanique des sols appliquée, Dunod, Paris

TURNER, J.S. (1979), Buoyancy effects in fluids, Cambr. University Press, 368 p.

VESIC, A.S. (1973), Analysis of ultimate loads of shallow foundations, J. Soils Mech. and Found. div., ASCE, vol. 99, SMI, pp. 45-73

VISHER, G.S. (1969), Grain size distributions and depositional processes, Journ. Sed. Petr., No. 39, pp. 1074-1106

VISHER, G.S. and CUNNINGHAM, R.D. (1981), Convolute laminations - a theoretical analysis: example of a Pennsylvanian sandstone, Sedimentary Geology, No. 28, pp. 175-188

VULLIET, L. (1986), Modélisation des pentes naturelles en mouvement. Thèse N° 635, EPFL, 221 p.

WEAVER, J.D. and JEFFCOAT, R.E. (1978), Carbonate ball-and-pillow structures, Geol. Mag., No. 115,4, pp. 245-253

WILLETTS, B.B. and RICE, M.A. (1983), Practical representation of characteristic grain shape of sands: a comparison of methods, Sedimentology, No. 30, pp. 557-565

WILLIAMS, E. (1963), Intra-stratal flow and convolute folding, Geol. Mag., No. 97, pp. 208-214

WINKELMOLEN, A.M. (1971), Rollability, a functional shape property of sand grains, J. Sedim. Petrol., No. 41, 703-714

WUNDERLICH, F. (1967), Die Entstehung von "convolute bedding" an Plattenrändern, Senkenberg. Lethae, No. 48, pp. 345-349

ZIPPE, H.J. and GRAF, W.H. (1983), Turbulent boundary-layer flow over permeable and non-permeable rough surface, Journ. of Hydraulic Res., No. 21, 1, pp. 51-65

REMERCIEMENTS

J'adresse mes plus vifs remerciements à Messieurs les Professeurs J.H. Gabus et E. Recordon pour leur bienveillance et leurs conseils au cours de ce travail.

Toute ma gratitude va à tous les collaborateurs de l'ISRF en particulier à Monsieur A. Parriaux et Madame E. Zoller.

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide du Professeur Lang de l'Institut für Grundbau und Bodenmechanik à Zurich, et de ses collaborateurs Messieurs Prater et Hotz, de Monsieur Caloz de l'Institut du Génie Rural, de l'Institut Interdépartemental de Métallurgie, et du Professeur del Pedro, directeur du Laboratoire de Mécanique appliquée et de son collaborateur Monsieur Loureiro, à qui j'exprime ma reconnaissance.

Merci aussi à l'entreprise Desmeules à Granges qui m'a autorisé à faire toutes les investigations nécessaires dans le périmètre de sa gravière.

CURRICULUM VITAE

Originaire de Martigny et d'Orsières, je suis né à Lausanne le 4 mars 1954. Après avoir fréquenté les écoles de Martigny et St-Maurice, j'ai obtenu mon certificat de maturité A au Collège de Brigue en 1973. Puis j'étudiai le Génie Civil à l'EPFL où le diplôme me fut décerné en janvier 1978.

Ma vie professionnelle commença alors au Service des Monuments Historiques de l'Etat du Valais. Puis je me spécialisai en géologie, minéralogie et sédimentologie à l'Université de Fribourg en 1978 et 1979. Dès lors, je travaillai au Laboratoire de Géologie de l'EPFL, en menant de front la thèse, des expertises du Laboratoire et l'enseignement des travaux pratiques de géologie, jusqu'en 1987. Je reçus le certificat de géophysique de l'Université de Lausanne en 1981. En 1985, j'ouvris mon propre bureau d'ingénieur, spécialisé dans les domaines des fondations, de l'hydrogéologie et des travaux en rocher à Martigny avec un vaste champ d'activité allant des parois ancrées à la prospection minière.

LISTE DES PUBLICATIONS

TISSIERES P., 1978: Réflexions sur quelques problèmes de l'eau à Forum Claudii Vallensium. Annales valaisanne, pp. 175-191.

SAUGY B., DOY R., MATHEY B., ARAGNO M., GEISTER M., RIEBEN C., MISEREZ J.-J., PARRIAUX A., TISSIERES P. et VUILLEUMIER F., 1984: Deux cycles SPEOS. Stockage pilote d'énergie par ouvrage souterrain. Bulletin du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, 5, pp. 125-144.

LUTZ T., PARRIAUX A. et TISSIERES P., 1987: Traçage au Gouffre du Chevrier (Préalpes vaudoises) et méthodes d'identification de l'uranine à faible concentration. - Bull. Centre d'Hydrogéologie Univ. Neuchâtel, No. 7, pp. 139-168.

TISSIERES P., 1988: L'activité minière dans le Mont-Chemin. - Annales Valaisannes, pp. 65-83.

